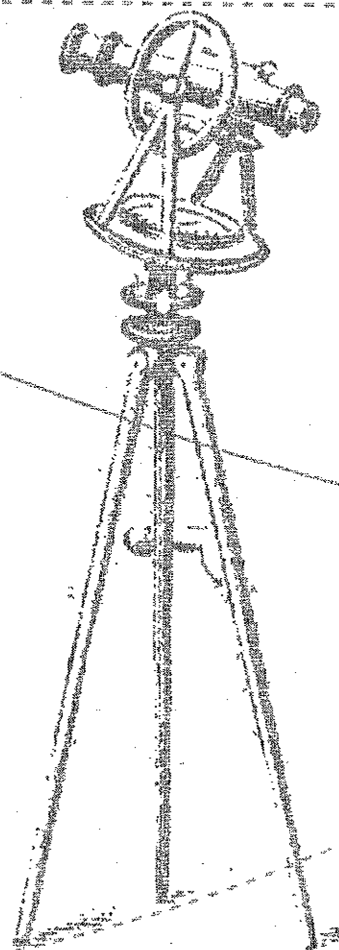


מדריך למורה

אסטרונומיה בפעולה

למידה בסביבת חקר מתוקשבת



מהדורת עיצוב

פרחי מדע

מרכז ארצי ללימוד ומחקר באסטרונומיה

מכללת עמק הירדן

יצא לאור ביוזמתו ובפיקוחו

של המרכז הישראלי להוראת המדעים

ע״ש עמוס דה שליט



רכס

הוצאה לאור

פרוייקטים חינוכיים בע"מ

מאי 2000

אייר תש״ס



אסטרונומיה בפעולה
למידה בסביבת חקר מתוקשבת

צוות הפיתוח

דר' דוד פונדק - ראש הצוות

רותי חנן - רכזת השתלמויות מורים

דר' גנאדי רויזמן - מנהל מצפה הכוכבים "כנרת"

זהבה וגנר - רכזת פעילות נוער

רונן יעקבי - רכז פעילות באינטרנט

לווי והערות

דוד סלע - מנהל גף מדעים וטכנולוגיה, האגף לתוכניות לימודים

עריכה לשונית

יעקב קמחי

עיצוב עטיפה ועיצוב גרפי

נטלי תגר

החומר מותאם להוראה במסגרת לימודי האופטיקה שבתכנית הלימודים בפיזיקה לחטיבה העליונה.

להערות והתייחסיות נא לפנות אל:

"פרחי מדע" - מרכז ללימוד ולמחקר באסטרונומיה

מכללת עמק הירדן 15132

טל - 06-6653743,8,9, פקס - 06-6653705

דואר אלקטרוני - **dudu@yarden.ac.il**

אתר אינטרנט - **www.yarden.ac.il/blossoms.htm**

רכס הוצאה לאור פרוייקטים חינוכיים בע"מ

ת.ד. 75 אבן יהודה 40550

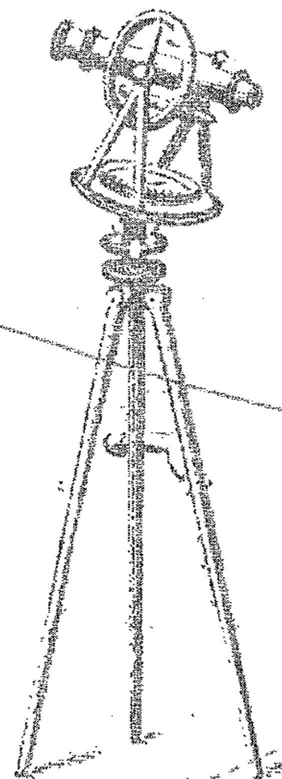
טלפון: 09-8991175-9 פקס: 09-8991061

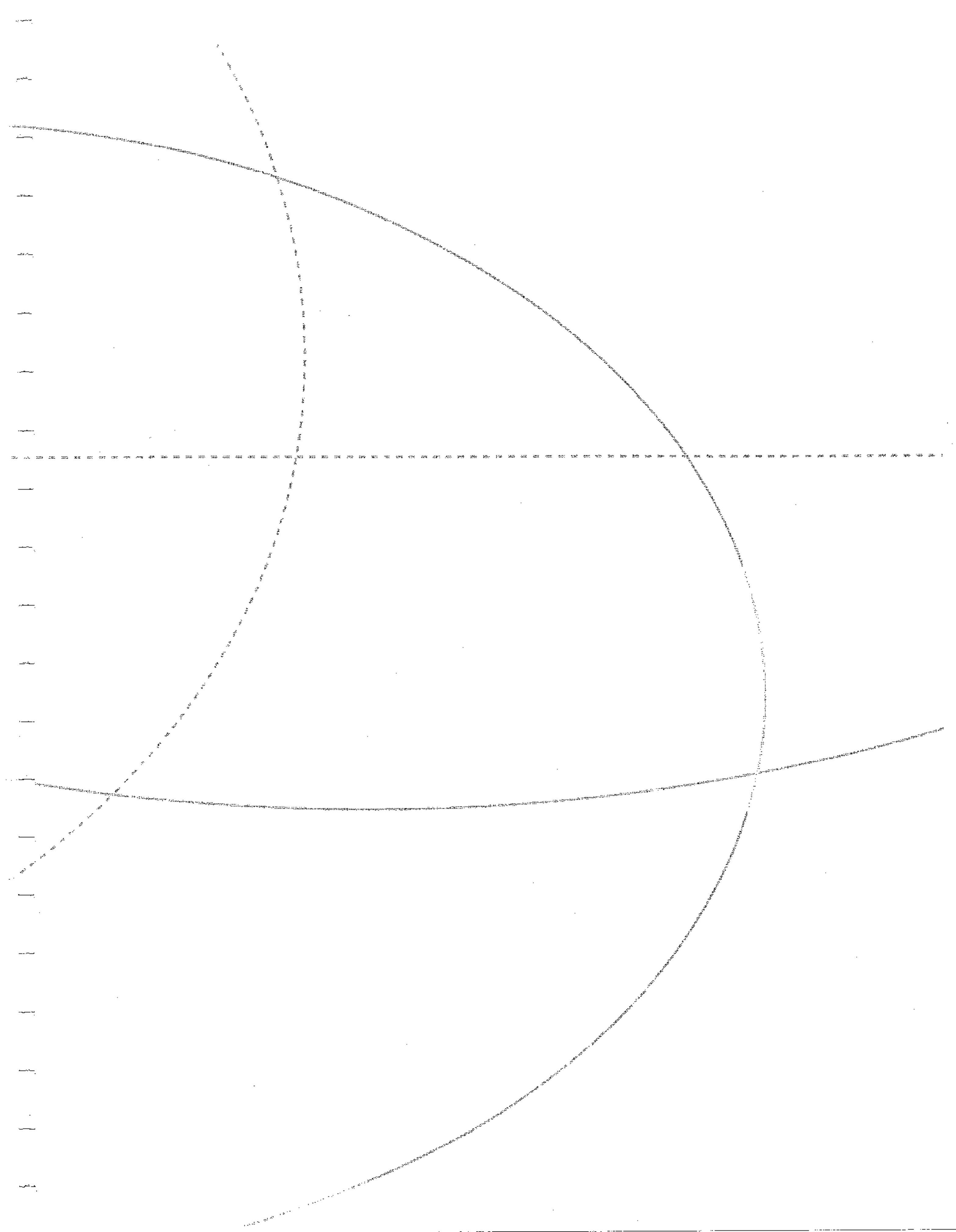
ISBN 965-403-185-X מסת"ב

מדריך למורה

אסטרונומיה בפעולה

למידה בסביבת חקר מתוקשבת

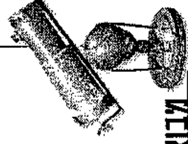




סדר הפרקים

סדר הפרקים





מבוא



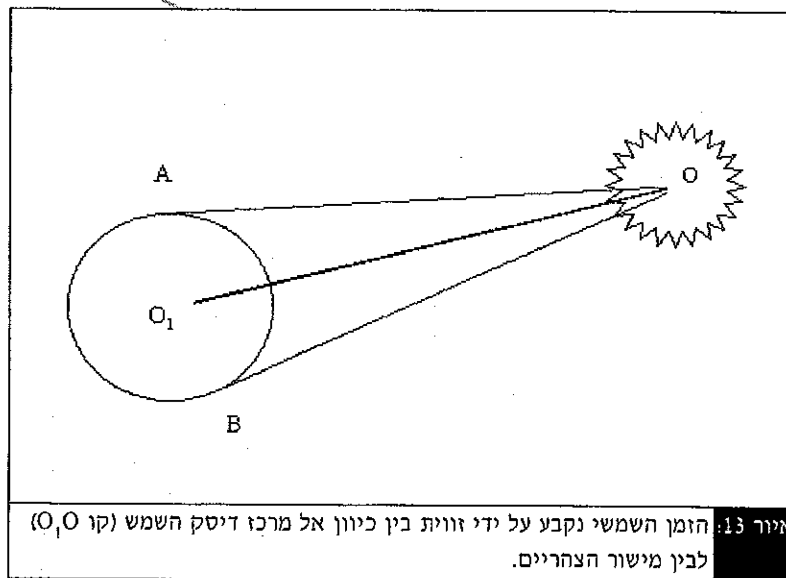
לצורך הגדרת המושג יממה כוכבית נגדיר תחילה מהו מעבר עליון.
מעבר עליון של כוכב מסוים הוא הרגע שבו כוכב חותך את מישור קו הצהריים בצד הדרומי שלו.
יממה כוכבית היא רווח זמן בין שני מעברים עליונים עוקבים של נקודת שוויון אביבי באותו מקום על פני כדור הארץ.

היממה הכוכבית מורכבת, כרגיל, מ-24 שעות או 1,440 דקות או 86,400 שניות. הזמן שעבר ממעבר עליון אחרון נקרא הזמן הכוכבי.

בניגוד לזמן כוכבי, מדידות הזמן השמשי מבוססות על תנועת השמש במהלך יממה.

יממה שמשית היא רווח זמן בין שני מעברים תחתונים עוקבים של מרכז דיסק השמש באותו מקום על פני כדור הארץ.

מעבר תחתון של גרם שמים מסוים הוא הרגע, שבו גרם השמים חותך את מישור קו הצהריים בצד הצפוני שלו. במקומות שונים על פני כדור הארץ הכיוון אל מרכז דיסק השמש שונה. לכן משתמשים בקו המחבר בין מרכז דיסק השמש לבין מרכז כדור הארץ בתור הכיוון הזה (ראה איור 13). מעבר תחתון של השמש (חצות) מסמן תחילת יממה שמשית אמיתית.



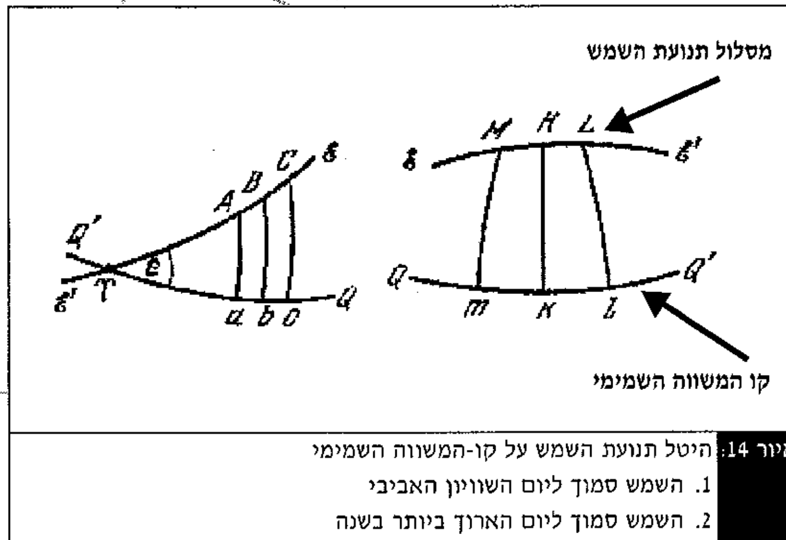
איור 13: הזמן השמשי נקבע על ידי זווית בין כיוון אל מרכז דיסק השמש (קו O_1O) לבין מישור הצהריים.



הזמן השמשי האמיתי אינו מתאים לשימוש יומיומי. שתי סיבות לכך:

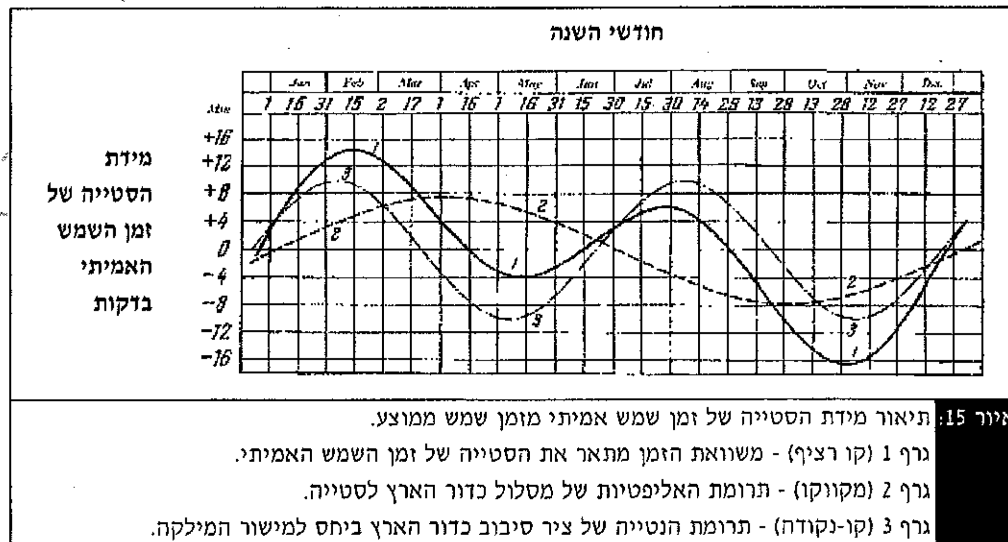
1. תנועה לא קצובה של השמש בשמים במהלך שנה, כי מסלול כדור הארץ אינו מעגלי.
2. שיפוע של מסלול השמש ביחס לקו-המשווה השמימי.

בגלל הזווית בין מסלול תנועת השמש לבין מישור של קו-המשווה השמימי קטעים שווים בתנועת השמש בהטלה על קו-המשווה הופכים לקשתות לא שוות (ראה איור 14). לכן הזמן השמשי הנמדד כזווית הסיבוב של מרכז דיסק השמש לא יהיה קצוב.



איור 14: היטל תנועת השמש על קו-המשווה השמימי
1. השמש סמוך ליום השוויון האביבי
2. השמש סמוך ליום הארוך ביותר בשנה

למעשה, משתמשים ב"זמן שמשי ממוצע" הזמן שנקבע על ידי "השמש הממוצעת" הדמיונית שזזה על קו-המשווה השמימי במהירות קבועה. ההפרש בין הזמן השמשי האמיתי לבין הזמן השמשי הממוצע משתנה במהלך שנה ומכונה "משוואת זמן". ארבע פעמים במהלך שנה הזמנים הללו משתווים (ראה איור 15) ב-15 באפריל, 14 ביוני, 1 בספטמבר ו-24 בדצמבר, אך לעתים ההבדל ביניהם מגיע עד ל-18 דקות.



איור 15: תיאור מידת הסטייה של זמן שמש אמיתי מזמן שמש ממוצע.
גרף 1 (קו רציף) - משוואת הזמן מתאר את הסטייה של זמן השמש האמיתי.
גרף 2 (מקווקו) - תרומת האליפטיות של מסלול כדור הארץ לסטייה.
גרף 3 (קו-נקודה) - תרומת הנטייה של ציר סיבוב כדור הארץ ביחס למישור המילקה.

כידוע, כדור הארץ מסתובב סביב צירו, ובו-זמנית סובב סביב השמש. משום ששני הסיבובים הללו מתבצעים באותו כיוון (נגד כיוון השעון במבט מלמעלה), נוצר הבדל בין מספר הסיבובים שכדור הארץ סובב סביב צירו ביחס לכוכבים (366 סיבובים במהלך שנה) לבין מספר הסיבובים שכדור הארץ סובב סביב צירו ביחס לשמש (365 סיבובים). ההבדל הוא תוצאה של סיבוב נוסף של כדור הארץ סביב השמש. אילו היה צד אחד של כדור הארץ תמיד מופנה לשמש (כלומר, אילו כדור הארץ לא היה מסתובב סביב צירו ביחס לשמש), גם אז הוא היה עושה סיבוב אחד סביב צירו ביחס לכוכבים.

סיבוב אחד (24 שעות) במהלך שנה (365.24220 יממות השמש) יוצר הבדל בין יממת השמש לבין יממת הכוכבים שהוא:

$$\frac{24^h}{365.24220} = 3_m\ 56.555_S$$

במילים אחרות: יממת הכוכבים קצרה מיממת השמש ב-3 דקות ו-56.666 שניות. בגלל האי-התאמה הזאת כל ערב כוכב מסוים יזרח ב-3 דקות ו-56.555 שניות מוקדם יותר מאשר יום קודם. **זאת הסיבה לכך** שבחיי היומיום איננו משתמשים בשעון כוכבי, אך בתצפית אסטרונומית משתמשים דווקא בשעון זה.

$$M = \frac{366.2422}{365.2422} S^* = 1.002738\ S^*$$

אם נסמן פרק-זמן על-פי שעון השמש כ-M, ואותו פרק-הזמן על-פי השעון הכוכבי כ- *S , אז נקבל:

$$S^* = \frac{365.2422}{366.2422} M = 0.997270\ M$$

זמנים במקומות שונים על פני כדור הארץ שונים זה מזה. זמן כוכבי *S וזמן שמשי ממוצע M בקו-אורך מסוים נקראים הזמן הכוכבי המקומי והזמן השמשי המקומי. **לדוגמה**, בכל המקומות הנמצאים על אותו קו-האורך יהיו הזמנים המקומיים שווים. הזמן המקומי השמשי על קו-האורך של Greenwich נקרא universal time (UT).

לו נהגנו על-פי הזמן השמשי, כאשר היינו מטיילים על פני כדור הארץ, היינו צריכים לעדכן את השעונים באופן קבוע בהתאם לשינויים בזמן מקומי. על מנת למנוע בעיה זו הוחלט בסוף המאה ה-19 לחלק את פני כדור הארץ ל-24 אזורי זמן.

רוחבו של אזור זמן הוא שעה אחת או ($360°/24=15°$). בכל אזור זמן קיים זמן אחיד, שנקבע על-פי הזמן המקומי של קו-האורך המרכזי, והזמן הזה נקרא **הזמן האזורי**.



כמו שראינו, הזמן שנקבע על-פי תצפיות אסטרונומיות אינו זמן קצוב. הסיבה העיקרית לכך - סיבוב לא קצוב של כדור הארץ סביב צירו וסביב השמש. לצורך ביצוע ניסוים מדויקים פיזיקאים זקוקים לזמן קצוב, שאינו משתנה. בשנת 1950 בכנס בינלאומי בפריס הסכימו מדענים על זמן קצוב, שנקרא "זמן ניוטוני" או ephemeris time. הזמן הזה משתתף כמשתנה במשוואות המתארות את תנועת הגופים במערכת השמש ונקבע כיום באמצעות "שעון אטומי". לפני 1950 נקבעה באסטרונומיה ובמדע היחידה הבסיסית של מדידת הזמן (השנייה) כ-1/86400 של יום השמש הממוצע. כיום מגדירים "שניה אטומית" כיחידת זמן שהיא המשך של 9,192,631,770 תנודות אלקטרומגנטיות של אור הנפלט על-ידי אטום Cs^{133}, כשהוא עובר בין שתי רמות מסוימות של אנרגיה. זמן אטומי הרבה יותר מדויק מן הזמן הנקבע על-פי תצפית אסטרונומית.

כיום באסטרונומיה מקובלת מערכת סימני הזמן כדלקמן:

א. **UTO** - הזמן השמשי הממוצע על קו האורך של Greenwich.

ב. במקומות שונים על כדור הארץ הזמן **UTO** יהיה שונה בגלל שינויים של קווי-אורך עקב תנועת הקטבים של כדור הארץ. הזמן המתוקן הוא על כן:

$$\mathbf{UT1 = UTO + \Delta\lambda}$$

ג. **UT1** - הוא זמן לא קצוב, בשל תנועת כדור הארץ. על מנת להגיע לקצב זמן שמשתנה פחות, מוסיפים ל-**UT1** תיקון קטן ומשתנה ΔT_s:

$$\mathbf{UT2 = UT1 + \Delta T_s}$$

ד. הזמן **UT2** עדיין אינו קצוב לגמרי. כדי לעבור ל"זמן ניוטוני" או ET ephemeris time (הזמן שנכנס למשוואות תנועה של גופים במערכת השמש), יש להוסיף ל-**UT2** תוספת קטנה:

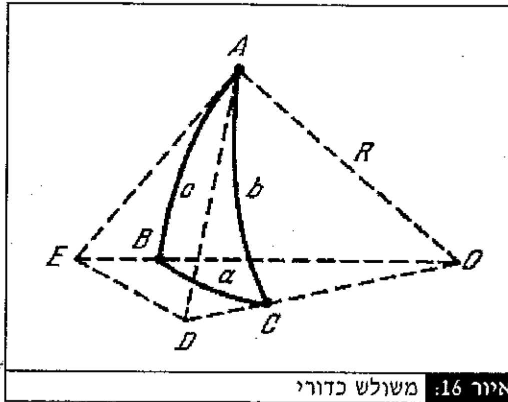
$$\mathbf{ET = UT2 + \Delta t}$$

כל התוספות למעבר בין הזמנים - $\Delta\lambda$, ΔT_s, Δt כל שנה מפרסמים בספרות מקצועית אסטרונומית (Astronomical Annual).

ה. אותות הזמן האטומי (UTC) משדרים היום ברדיו. כדי שלא תיווצר אי-התאמה בין הזמן האטומי לזמן האסטרונומי, כל פעם כאשר הפרש **[UTC-UT1]** מגיע ל-0.7 שניות, משנים את ה-**UTC** שהוא יהיה שווה ל-**UT1**. השינוי הזה מתבצע בדרך-כלל באחד בינואר ובאחד ביולי. כתוצאה מכך סקלת הזמן **UTC** גם מתאימה לצרכים אסטרונומיים וגם נשארת קצובה במידה מרבית.



12. חישוב מקומם של גרמי שמים



איור 16: משולש כדורי

מטרת פרק זה היא להציג בדרך שיטתית את החישוב של זמני השקיעה והזריחה של גרמי השמים וכן את מיקומם בשמים בשעות היום והלילה. חישוב מיקומם של גורמי השמים נעשה באסטרונומיה באמצעות משולשים דמיוניים על כיפת השמים. אלו אינם משולשים שטוחים המוכרים לנו מלימודי ההנדסה, אלא משולשים מעגליים.

הצלעות במשולשים אלה הן קשתות AB, AC ו-BC, כאשר כל קשת כזאת היא חלק של מעגל שמרכזו מתלכד עם מרכז כדור הארץ (ראה איור 16).

משולש כזה מכונה **"משולש כדורי"**. משום שלרדיוס של כיפת השמים אין ערך מסוים, נהוג למדוד אורך של כל צלע במשולש כדורי ביחידות של זווית בכוונה, שלכל צלע מתאימה זווית מרכזית מסוימת. לדוגמה, לצלע b מתאימה זווית AOC. זוויות של משולש כדורי A, B ו-C הן זוויות בין שני מישורים, לדוגמה זווית B היא זווית בין מישור ABO לבין מישור OBC. סכום הזוויות של משולשים כדוריים תמיד גדול מ-180^{o} וקטן מ-540^{o}.

עתה נביט במשולש הכדורי ABC המשורטט על כיפת השמים, כאשר - O מציין את מרכז כדור הארץ. דרך נקודה A נעביר שני קווים AE ו- AD, המשיקים לכיפת השמים בנקודה A.

עבור כל אחד משני המשולשים הרגילים ADE ו- ODE ניתן לרשום את משפט הקוסינוסים:

$$DE^2 = OD^2 + OE^2 - 2 \times OD \times OE \times \cos\alpha \qquad (1)$$

$$DE^2 = AD^2 + AE^2 - 2 \times AD \times AE \times \cos A \qquad (2)$$

חיסור (2) מתוך (1) נותן:

$$2 \bullet OD \bullet OE \bullet \cos\alpha = OD^2 - AD^2 + OE^2 - AE^2 + 2 \times AD \times AE \times \cos A \qquad (3)$$

מהעובדה שמשולשים OAE ו- OAD הם ישרי-זווית נובע:

$$OD^2 - AD^2 = R^2 \qquad OE^2 - AE^2 = R^2 \qquad (4)$$

$$AD = R \tan b; \qquad AE = R \tan c;$$

$$OE = \frac{R}{\cos b} \qquad OE = \frac{R}{\cos c}$$

נציב את (4) אל (3) ונקבל:

$$\cos\alpha = \sin b \times \cos c + \sin b \times \sin c \times \cos A \quad (5)$$

נוסחה (5) היא הנוסחה הבסיסית בעולם של משולשים כדוריים. כמובן, ניתן לקבל עוד נוסחאות, אך נסתפק בכך.

בזמן זריחה או שקיעה של כוכב הגובה שלו $h = 0^o$ או $Z = 90^o$, לכן באמצעות (8) מקבלים:

$$\cos t = \frac{\cos(90^o) - \sin\varphi\ \sin\delta}{\cos\varphi\ \cos\delta} = -\tan\varphi\ \tan\delta \qquad (10)$$

מתוך המשוואה (10) מתקבלות שתי תשובות: חיובית $t = t_1$ ושלילית $t = -t_2$.
הערך החיובי של t מייצג את שקיעת הכוכב, ואילו הערך השלילי מייצג את זריחתו.
הזמן הכוכבי של זריחה ושל שקיעה שווה אז בהתאמה:

$$s = \alpha - t$$
$$s = +t$$

על מנת לחשב את האזימוט של נקודות הזריחה והשקיעה, נציב אל (9) $Z = 90^o$. נקבל:

$$\cos A = -\frac{\sin\delta}{\cos\varphi} \qquad (11)$$

על-פי (11) נקבל שני ערכים של אזימוט: $A_1 = A$ ו-$A_2 = 360^o$. הערך הראשון מייצג את אזימוט השקיעה, ואילו הערך השני מייצג את אזימוט הכוכב בנקודת הזריחה.

לסיום, נרשום את (10) ו- (11) בצורה אחרת:

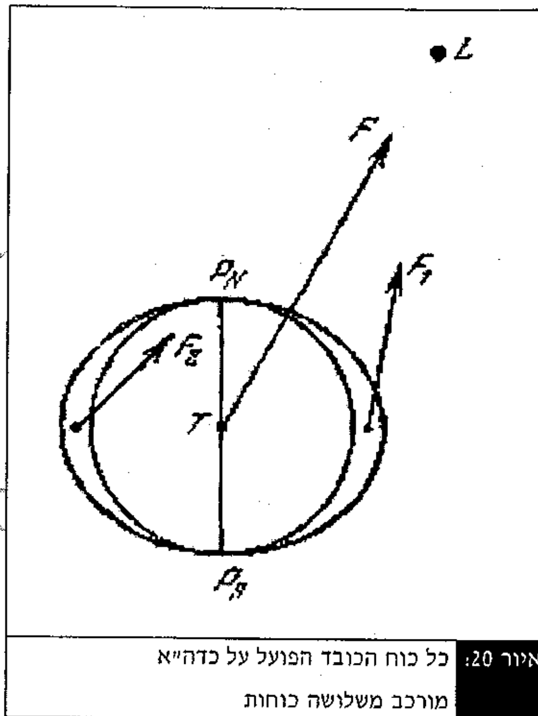
$$\cos A = -\frac{\sin\delta}{\sin(90^o - \varphi)} \qquad \cos t = -\frac{\tan\delta}{\tan(90^o - \varphi)}$$

כיוון שלא ייתכן ש-cosx>1-, משתי הנוסחאות נובע כי שקיעה וזריחה של גרם השמים מתקיימות רק בתנאי ש-

$$|\delta| < (90^o - |\varphi|)$$

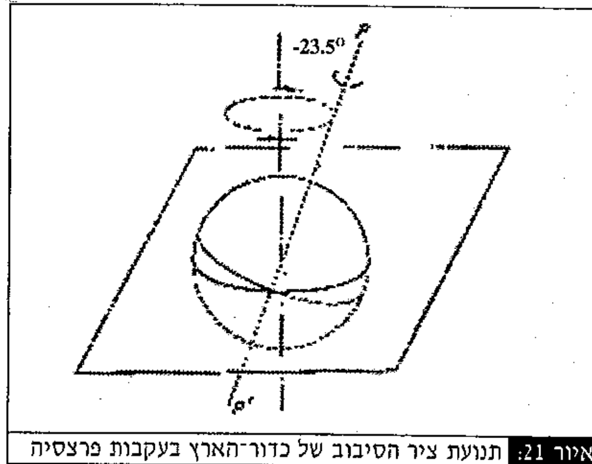
15. **תנועת נקיפה** (precession) **ותנועת נענוע** (notation) **של כדור הארץ**

אילו היה כדור הארץ (כדה"א) אחיד ומוצק, אזי המהירות והכיוון של הסיבוב סביב צירו היו נשארים קבועים לאורך הזמן. אך בניגוד לשמו, כדה"א אינו כדור. צורתו דומה יותר לאליפסואיד (ראה איור 20). כוח הכובד F_0 שמפעיל על כדה"א גוף כלשהו L, יהיה מורכב משלושה כוחות: F - כוח הפועל על הכדור החסום, F_1 - כוח הפועל על "התוספת" הקרובה ו-F_2 - כוח הפועל על "תוספת רחוקה". כיוון שהכוח F_1 גדול מהכוח F_{20}, כוח הכובד F_0 מנסה בסך-הכול לסובב את כדה"א נגד השעון, כך שקו-המשווה יהיה מקביל לכיוון פעולת הכוח F_0. במקרה כזה כדה"א מתנהג כמו סביבון, כלומר ציר הסיבוב שלו יסטה בכיוון המאונך ל- "מישור הכוחות" F_1 ו-F_2.



איור 20: כל כוח הכובד הפועל על כדה"א מורכב משלושה כוחות

הגופים שהשפעתם על כדהא משמעותית במיוחד הם השמש והירח. בהשפעתם ציר הסיבוב של כדהא מבצע תנועה מורכבת מאוד בחלל.



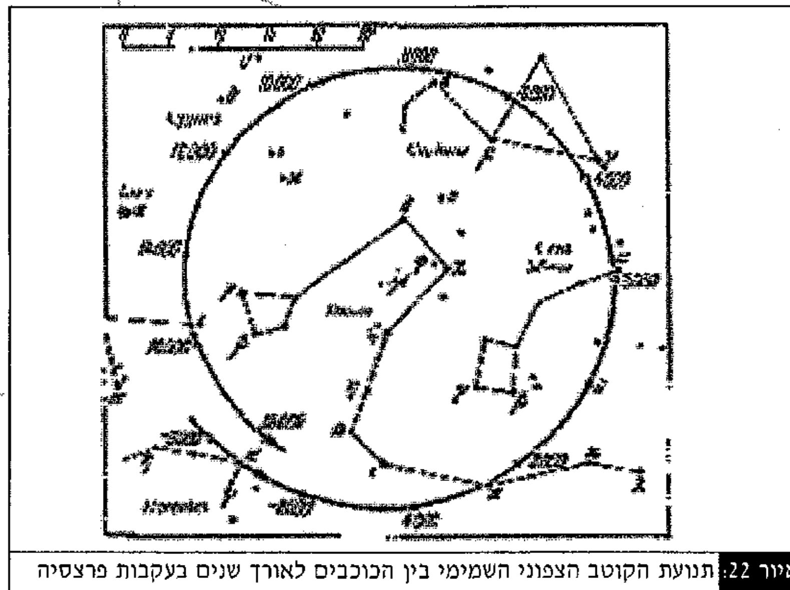
איור 21: תנועת ציר הסיבוב של כדור־הארץ בעקבות פרצסיה

קודם כל, ציר הסיבוב של כדה"א **PP** (ראה איור 21) זז סביב אנך למישור סיבוב כדה"א סביב השמש, כך שהזווית ביניהם נשארת כמעט קבועה 23°27'. תנועה זאת נקראת **תנועת נקיפה**, זמן המחזור שלה כ-26,000 שנים. בהשפעת תנועת הנקיפה הקוטב הצפוני השמימי (וגם הקוטב הדרומי) זז בין כוכבים במשך זמן (ראה איור 18). מסלול הקוטב אינו סגור, משום שבנוסף לירח ולשמש משפיעות על כדה"א גם פלנטות של מערכת השמש, אשר גורמות לסטיית מישור האקליפטיקה. כידוע, ציר הסיבוב של כדה"א והן מישור של קו-המשווה השמימי (המאונך לציר הסיבוב) קובעים את הקואורדינטות השמימיות של כוכבים. לכן בעקבות הפרצסיה קואורדינטות שמימיות של כוכבים משתנות בהתמדה.

כמו שניתן לראות באיור 22, כעת הקוטב הצפוני השמימי נמצא סמוך לכוכב α Ursae Minoris, הידוע יותר בשמו "כוכב הצפון". שמו נובע מהעובדה הפיזקלית הפשוטה, שציר סיבוב כדה"א מופנה, בקירוב רב אליו. אך לפני כ-4,000 שנים שימש Draconis כ"כוכב הצפון", כי הוא היה הקרוב ביותר לקוטב השמימי.

לפני כ- 3,500-3,000 שנים היה הקוטב קרוב לכוכב Ursae Minoris . לכוכב זה יש שם מעניין: Kohav, כלומר "כוכב", בדיוק כפי שהוא נשמע בשפה העברית.

נציין שבעוד כ-12,000 שנים יהיה הכוכב שיתפקד כ"כוכב הצפון" כוכב בהיר ביותר בשמי הצפון: Lyrae - Vega.



איור 22: תנועת הקוטב הצפוני השמימי בין הכוכבים לאורך שנים בעקבות פרצסיה

בגלל הנקיפה המצב היחסי בין מישור של קו-המשווה השמימי לבין מישור האקליפטיקה (סיבוב כדה"א סביב השמש) משתנה, ונקודות החיתוך שלהם זזות באיטיות מערבה "50.26 לשנה. לנקודות אלה נודעת חשיבות רבה. כאשר השמש נמצאת באחת מהן, קיים שוויון בין משך היום למשך הלילה. כיוון שהנקודות זזות מערבה, נגד תנועה שנתית של השמש לאורך האקליפטיקה, כל פעם השמש מגיעה אל נקודות אלה מוקדם יותר. לכן רווח הזמן בין שני מעברים עוקבים של השמש דרך נקודה כזאת (שנה טרופית) יהיה קצר יותר מאשר זמן סיבוב של כדהא סביב השמש (שנה כוכבית). ההפרש שווה בערך ל- 20 דקות - זה הזמן הדרוש לשמש למעבר זווית בת "50.26 (השמש עוברת כל יממה כמעלה אחת מזרחה לאורך האקליפטיקה).

תנועת הנקיפה גורמת לשינוי איטי במראה שמי הלילה. בעוד אלפי שנים יוכלו הדורות הבאים לראות בשמים הצפוניים את קבוצת הכוכבים Crux, בעוד ש-Sirius ו-Orion יעברו לשמים דרומיים.

בנוסף לתנועת הנקיפה של ציר כדה"א, כדה"א נע בתנועות קטנות יותר סביב צירו הנוכחי. תנועות אלה מתקיימות בהשפעת כוחות F_1 ו-F_2, המופעלים על-ידי השמש והירח. כיוון הכוחות וגודלם משתנים בעקביות.

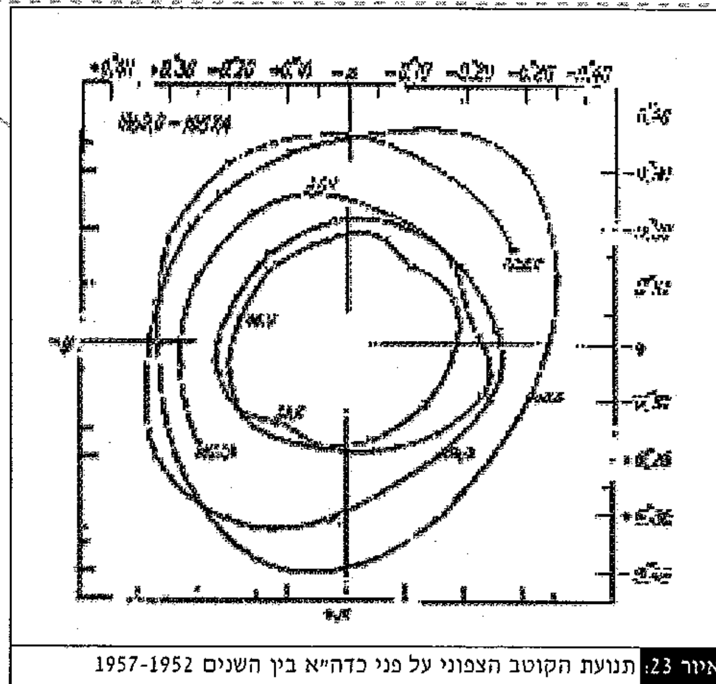
הכוחות הולכים וגדלים, ככל שהשמש והירח נמצאים רחוק יותר ממישור המשווה של כדה"א. סוג זה של תנועת הציר

כדה״א נקרא **תנועת נענוע** (notation). זמן מחזור של תנועת הנענוע העיקרית שווה ל-18.6 שנים. כתוצאה מתנועה זו זז הקוטב השמימי של כדה״א בין קבוצות כוכבים בצורה אליפטית. גודל צירי האליפסה הוא ״18.42 ו-״13.72.

16. תנועת הקטבים של כדה״א

מתוך תצפית התברר שקווי-הרוחב והאורך של נקודה כלשהי על פני כדה״א אינם נשארים קבועים, אלא משתנים. תופעה זאת משקפת את תנועת כדהא סביב ציר הסיבוב שלו. ברגעים שונים ציר הסיבוב של כדה״א עובר דרך נקודות שונות. כך נוצר ״קוטב זז״ (ראה איור 23). תנועת הקוטב מתרחשת נגד כיוון השעון ובתוך ריבוע בעל צלע כ-30 מאיות שנית קשת. התנועה היא תנועה מחזורית מסובכת, וניתן לבודד שני מחזורים עיקריים: מחזור שנתי (12 חודשים) ומחזור Chandler (14 חודשים). המחזור השנתי קשור לתנועות אוויר ומים עונתיות, המשנות התפלגות מסות בכדה״א ומזיזות אותו ביחס לצירו.

מחזור Chandler הוא מחזור של תנודות טבעיות של כדה״א . על-פי חישובים מחזור Chandler אמור להיות שווה ל-10 חודשים, אילו היה כדה״א גוף קשיח. אך במציאות כדה״א הוא גוף אלסטי ועשוי להתעוות. עיוות זה מגדיל את זמן המחזור עד ל-14 חודשים.



איור 23: תנועת הקוטב הצפוני על פני כדה״א בין השנים 1957-1952





תנועת השמש

פרק ב': הספק השמש וקוטרה



פעילות 3: מדידת הספק השמש - דידקטיקה

מבוא

בשתי הפעילויות הראשונות שביצענו ערכנו היכרות עם השפעת תנועת השמש עלינו כתושבי כדה״א. בשתי פעילויות שבהן נעסוק בפרק זה נערוך היכרות עם תכונות השמש, כלומר נעבור מתיאור איכותי של תנועה ומקום למדידה כמותית של כמות קרינה ושל קוטר השמש. המפגש עם השמש הוא קפיצת מדרגה עבור התלמידים, כמות הקרינה הנפלטת ממנה בהשוואה למה שמוכר על פני כדור הארץ, היא גדול לאין שיעור. הדבר נכון גם באשר לממדיה, שאינם נתפסים על ידי מי שרגיל בממדים יומיומיים קילומטרים אחדים.

הפעילות הראשונה - מדידת הספק השמש, מורכבת מארבעה חלקים:

1. מה דעתך? בירור עמדות פתיחה של התלמידים - 20 דקות.
2. בניית פוטומטר פשוט שיטה להערכת עוצמת קרינה - 30 דקות.
3. חקירת הקשר בין עוצמת ההארה למרחק ממקור אור נקודתי - 30 דקות.
4. מדידת הספק השמש - 30 דקות.

רצוי לעבור על הפעילויות לפי סדרן. ייתכן שכבר הספקתם ללמד את נושא הקשר בין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי בשיטה שונה מזו המוצעת כאן. במקרה זה יהיה עליכם לשקול אם ברצונכם להציג שיטה נוספת או לוותר על מרכיב זה בפעילות בשל אילוצי זמן. מעבר על כל חלקי הפעילות כולל מבוא וסיכום נאות דורש כשלושה שיעורים באורך של 45 דקות, אלא אם כן ניתן לוותר על חלק ב בפעילות.

מה דעתך?

כיצד ניתן להעריך כמה אנרגיה פולטת השמש? הניסיון היומיומי של התלמידים לגבי כמות אנרגיה הנפלטת ממקורות אור קשור לנורות חשמליות או למדורות. מושג האנרגיה אצל מרבית התלמידים מעורפל למדיי, אך הם שמעו אותו פעמים רבות ויודעים שיש לשלם על צריכת אנרגיה. יחידה זו מנסה לברר את הקושי במעבר בין הידע היומיומי לבין הידע הפיזיקלי לגבי כמות האנרגיה של השמש.

בשלב ראשון יש לבקש מהתלמידים לענות באופן אישי להתייעץ עם חבריהם. משך זמן זה כעשר דקות. לאחר מכן ניתן להקדיש כחמש דקות לדיון קבוצתי, שבו יציגו התלמידים את עמדותיהם, וחמש דקות לדיון במליאה. במקרה של לחץ בזמן ניתן להסתפק באיסוף התשובות לשתי השאלות הראשונות בלבד. בשלב זה ישקף המורה את עמדות התלמידים השונות בלי לציין את עמדתו.



שאלה 1

במקרים רבים תלמידים נוטים להעריך שכמות האנרגיה הנצרכת על ידי תושבי כדה״א גדולה מזו הנפלטת על ידי השמש.

הערכה גסה של כמות האנרגיה הנצרכת על ידי תושבי כדה״א במשך שנה תתבסס על כמות צריכת החשמל על-ידיהם. החשבון המובא כאן הוא לצורך הידע של המורה, ואין לחלוק אותו בשלב זה עם התלמידים. ניתן להשתמש בו רק לאחר סיום הפעילות, כאשר נחזור ונשווה את עמדות הפתיחה עם המדידות שביצענו.

נעריך את ההספק הנצרך ע״י תושבי העולם בהשוואה להספק הנצרך על ידי תושבי ישראל. זהו אינו חשבון מדויק, אך הוא נותן סדר-גודל, ודי לנו בכך. ההספק החשמלי שצורכים תושבי ישראל הוא 10^{10} וט בערך. מספר תושבי העולם הוא פי אלף לערך ממספר תושבי ישראל, לכן נעריך את ההספק החשמלי של האנושות ב-10^{13} וט בערך. מספר השניות בשנה הוא כ-31 מיליון. לכן ניתן להעריך את האנרגיה החשמלית הנצרכת על ידי כל תושבי כדה״א במשך שנה בסדר-גודל משוער של 10^{20} ג׳יאול בשנה. הספק השמש הוא 10^{26} וט בערך. כלומר כמות האנרגיה הנפלטת מהשמש בשנייה אחת תוכל להספיק למשך מיליון שנה לצריכת אנרגיה חשמלית של תושבי כדה״א. אם נרצה להעריך את כלל האנרגיה הנצרכת על ידי תושבי הארץ נצטרך להגדיל כמות זו בסדר-גודל אחד לערך. כלומר במקרה זה אנרגיית השמש הנפלטת בשנייה אחת, תספיק ״רק״ למאה אלף שנה.

שאלה 2

במקרים רבים תלמידים מעריכים שקיים הבדל משמעותי, והצריכה השנתית של אנרגיה על ידי תושבי כדה״א גדולה בהרבה מזו הנפלטת מהשמש בשניה אחת. מחישוב שנעשה בתשובה לשאלה הקודמת ברור שהערכה זו אינה נכונה, למרות שהיא רווחת למדיי.

שאלה 3

במחקר קודם שערכנו התברר כי למעלה מתשעים אחוז מתלמידי התיכון סבורים שמקור האור של כוכבים הוא השמש. זוהי שגיאה נפוצה למדיי. קשה לשכנע תלמידים שאין זה כך, כאשר סקלת המרחקים שלהם היא סקלה ארצית.

שאלה 4

השמש היא כוכב בינוני, כלומר כמחצית מהכוכבים שאנו רואים מאירים בעוצמה גדולה מזו של השמש. כדי לדעת זאת יש למדוד את המרחק אל כוכבים אלה ולהשוות אותו עם עוצמת ההארה של הכוכבים. מדידה זו דומה עקרונית לדרך המדידה של הספק השמש. מכאן שבפעילות זו שבה אנו מודדים את הספק השמש, נכיר שיטה שתאפשר למדוד גם את ההספקים של כוכבים אחרים. אלא שאז יש להשתמש בפוטומטרים בעלי רגישות גבוהה מאוד, שכן עוצמת ההארה המגיעה מהכוכבים נמוכה בסדרי-גודל רבים מעוצמת ההארה של השמש.



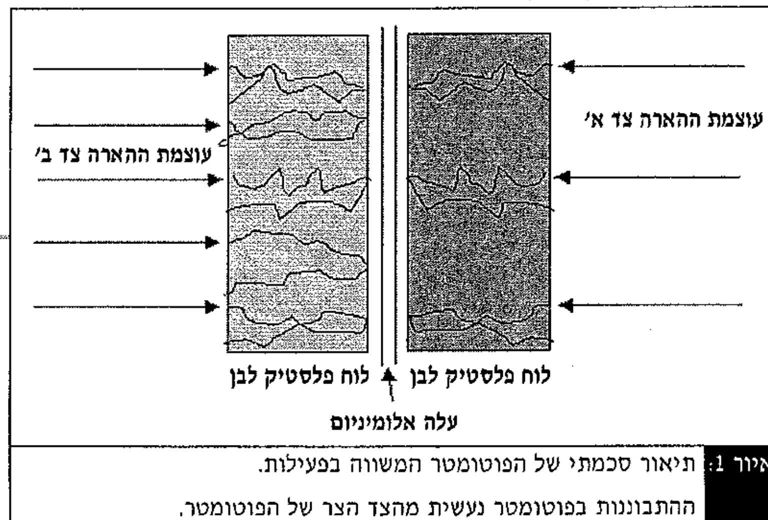
התשובות המופיעות כאן הן לצורכי המורה, אך אין להציג אותן בשלב זה בפני הכיתה, אלא לרכז את עמדות התלמידים. התייחסות מסודרת לעמדות התלמידים תיעשה רק לאחר שתתבצע הפעילות. כלומר בידי התלמידים תהיה הערכה מסודרת של הספק השמש, והם יוכלו להתרשם מקצב ייצור האנרגיה בשמש לעומת קצב צריכת האנרגיה ע"י המין האנושי.

חלק א: בניית פוטומטר פשוט

עוצמת ההארה היא מושג מורכב המתאר את היחס בין כמות אנרגיה שמגיעה ביחידת זמן ובין שטח. תיאור פיזיקלי מדויק של הנושא עלול להימשך זמן רב יחסית. בחלק זה של הפעילות אנו מבקשים להכיר את המושג באופן איכותי למדיי. טיפול חצי כמותי יעשה בחלק ב של הפעילות, לכן ניתן להתייחס אל עוצמת ההארה בשלב זה כאל גודל, שניתן להעריך אותו באמצעות התבוננות בעינינו במשטח מואר. ניתן להציג רצף איכותי של עוצמות ההארה החל מיום מעונן וגשום, המשך ביום מעונן חלקית וכלה ביום קיץ בהיר. ניתן לציין כי העין רגישה לעוצמות ההארה, וגודל האישון משתנה בהתאם לעוצמת ההארה. ניתן לבצע בהקשר לזה ניסוי איכותי קטן.

נבקש מהתלמידים להתבונן האחד בעיני חברו ולהתרשם מגודל האישון. השאלה שתעמוד לדיון תהיה מה יקרה, כאשר נכבה את האור בכיתה? האם האישון יגדל, יקטן או יישאר ללא שינוי. התלמידים יתבקשו להבהיר את עמדתם. לאחר מכן נכבה את האור בכיתה ונבקש מהתלמידים לעקוב אחרי השינוי בגודל האישון. יש להמתין כדקה לפני שניתן לראות את השינוי בתנאי האפלה. התוצאה היא ששטח האישון גדל. למעשה, העין היא חיישן תאורה המשנה את גודלו בהתאם לתנאי התאורה. ככל שעוצמת ההארה קטנה כך גדל שטח האישון ולהפך. למעשה, לעין יש מנגנון המאפשר להגדיל את שטח האישון בתנאי תאורה נמוכים במטרה לאסוף אור משטח גודל יותר.

הפוטומטר שאנו עומדים לבנות מתואר בפירוט בחוברת לתלמיד. לוחות הפלסטיק הלבן של הפוטומטר נחתכו בגודל של 6 X 6 ס"מ מלוח חיתוך ירקות. תפקידו של רדיד האלומיניום הוא לבודד מבחינה אופטית בין שני חלקי הפוטומטר, כך שלא תהיה השפעה של עוצמת ההארה מצד אחד של הפוטומטר על צדו השני. בפוטומטר מתרחשים ארבעה תהליכים אופטיים: שבירה, פיזור, בליעה והחזרה.



איור 1: תיאור סכמתי של הפוטומטר המשווה בפעילות.
ההתבוננות בפוטומטר נעשית מהצד הצר של הפוטומטר.



תשובות לשאלות בחלק א'

1. ככל שמקרבים את הנורה אל הפוטומטר, הצד הפונה אל הנורה הולך ונעשה בהיר יותר, בעוד שהצד השני נשאר אפל. השוואה בין שני הצדדים מראה שקיים הבדל בין עוצמות ההארה. הצד המופנה אל המנורה הוא בעל עוצמה גבוהה יותר.

2. בתחילת הניסוי עוצמת ההארה של הצד הפונה אל הנורה בהספק 150 וט גדולה יותר מזו הפונה אל הנורה בהספק של 75 וט, שכן שתי הנורות נמצאות במרחק שווה, 1 מטר, משני צדי הפוטומטר. ככל שמרחיקים את נורת 150 וט, כך קטנה עוצמת ההארה.
במרחק של כ-140 ס"מ שתי עוצמות האור אמורות להשתוות. כאשר המרחק של נורת 150 הווט עולה על 140 ס"מ, תקטן עוצמתה מזו של נורת 75 הווט.

3. כפי שצוין בתשובה לשאלה 2 מרחק זה אמור להיות כ- 140 ס"מ בהתאם לחוק של ירידת עוצמת ההארה ביחס ישר לאחת חלקי המרחק בריבוע. מאחר שהספק הנורה הגדולה הוא פי שניים מהספק הנורה הקטנה, הרי שבמרחק השווה ל-1.41 = 2 מטרים עוצמת ההארה אמורה להשתוות. זוהי גם התוצאה בקירוב +/- 8 ס"מ במדידות בכיתה.

4. התייחסנו אל שאלה זו בתשובה הקודמת.

5. הפוטומטר הוא, כאמור, פוטומטר משווה, שתפקידו להבחין בין שתי עוצמות הארה. יש להתבונן בחלק הדק של הפוטומטר כדי להשוות בין שתי עוצמות ההארה. בהמשך ננצל פוטומטר זה להשוואה בין שתי עוצמות אור, האחת של השמש והשנייה של נורה.

ניתן להשתמש גם בפוטומטר משווה פשוט יותר - דף נייר עם כתם שמן במרכזו. מתברר שכתם השמן פועל בדרך דומה לפוטומטר המשווה. כאשר עוצמת האור מהצד הנגדי גבוהה יותר, כתם השמן נראה בהיר יותר מאשר הנייר, שכן הנייר ספוג השמן מעביר טוב יותר את האור בהשוואה לנייר רגיל. כאשר מתבוננים דרך הנייר אל עוצמת אור נמוכה יותר, כתם השמן נראה כהה יותר. אם שתי עוצמות ההארה שוות משני צדי הדף, כתם השמן נעלם.



חלק ב: חקירת הקשר שבין עוצמת ההארה לבין

המרחק ממקור אור נקודתי

1. חקירה בעזרת פוטומטר

חלק זה מאפשר לתלמיד להכיר את הקשר שבין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי. מורים רבים מציגים את הנושא כבר בראשית לימודי האופטיקה. אם כבר לימדת נושא זה, תוכל לבחון אחת משלוש האפשרויות:

א. להציג את הנושא בדרך פשוטה וקלה, כפי שהיא מופיעה בתדריך, כשכל קבוצת תלמידים מבצעת את הניסוי.

ב. לערוך הדגמה כאשר כל הכיתה צופה בה. במקרה זה ניתן לבצע את ההדגמה של חלק שני - חקירה בעזרת ספירת משבצות, בעזרת מטול שקפים שעליו תניח את הבריסטול המחורר. במקרה זה ניתן להתרחק מהמסך בקפיצות של מטר.

ג. להישען על הידע המוקדם של התלמידים ולעבור לחלק השלישי של הפעילות.

חלק הראשון בפעילות עוסק בניסיון לברר אם לתלמידים יש הערכה לגבי הקשר בין עוצמת ההארה למרחק. יש להניח שהתלמידים כבר יודעים שככל שמתרחקים ממקור האור, יורדת עוצמת ההארה, אך הם אינם יודעים מהו הקשר המתמטי, שאותו אנו מנסים לגלות בפעילות זו.

בעקבות הפעילות הקודמת שביצעו התלמידים, יש לשער שפיתחו הערכה לגבי המקום שבו יש להציב את הנורה בת 75 הווט, כאשר נורת 150 הווט נמצאת במרחק שני מטרים. יחד עם זאת לחלק מהתלמידים הדבר אינו מובן, וזוהי הזדמנות לשוחח ולבחון זאת שוב.
ניתן להסתפק בפעילות זו ולהציע את היחס הידוע שבין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי. אך אם ברצונך לתקור את הנושא יחד עם תלמידיך בצורה כמותית, עבור לחלק הבא של הפעילות.



2. חקירה בעזרת ספירת משבצות

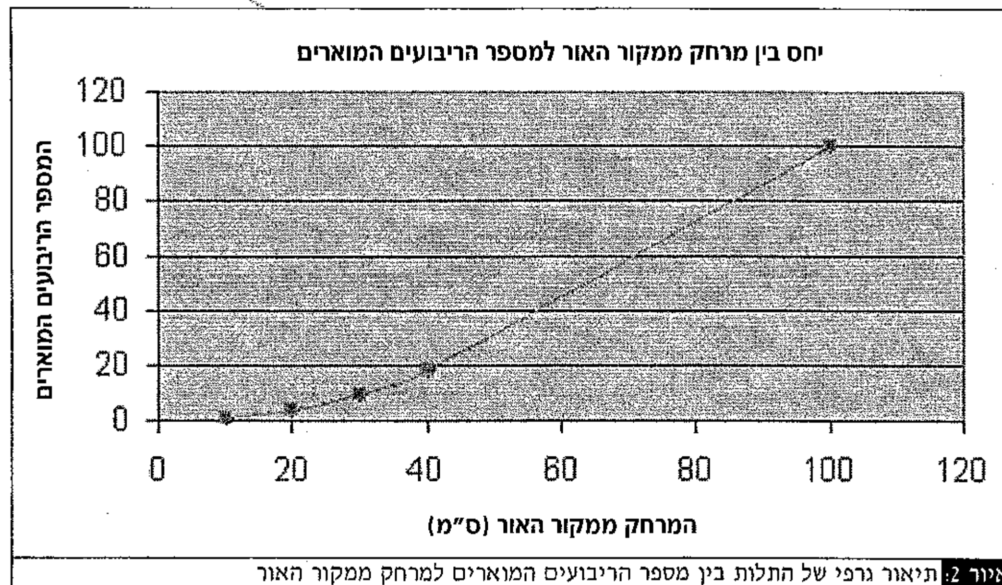
מטרת הפעילות להגיע ליחס כמותי בין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי. תיאור הניסוי בחוברת התלמיד מפורט למדיי. חלק זה של הפעילות דורש התארגנות מעבדתית עם ציוד פשוט המכיל מרכיבים רבים.

לפניך תוצאות שנאספו בכיתת ניסוי:

מרחק הדף המשובץ מהנורה (בס"מ)	מספר הריבועים המוארים	איזה חלק מהאור מקבלת כל משבצת?	מספר הנורות שיאירו בעוצמה זהה לנורה אחת שמרחקה 10 ס"מ
10	1	1	1
20	4	1/4	4
30	10	1/10	10
40	18	1/18	18
100	100	1/100	100

טבלה 2: תוצאות המדידה של עוצמת ההארה ביחס למרחק ממקור אור נקודתי

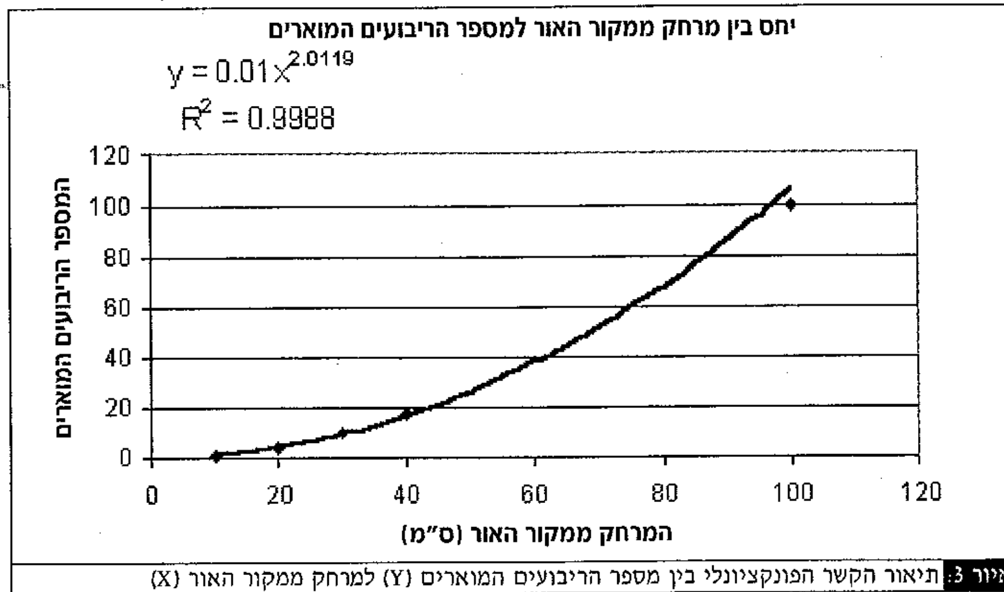
עיבוד שתי העמודות הראשונות לגרף, כאשר העמודה השנייה מייצגת את ההופכי של עוצמת ההארה, נותנת את התוצאות הבאות:



איור 2: תיאור גרפי של התלות בין מספר הריבועים המוארים למרחק ממקור האור



בעזרת גיליון Excel בוצע עיצוב קו מגמה של הגרף, והתקבלה התוצאה הבאה:



איור 3: תיאור הקשר הפונקציונלי בין מספר הריבועים המוארים (Y) למרחק ממקור האור (X)

ניתן לראות כי קיים יחס ישר בין המרחק בחזקה שנייה לבין ההופכי של עוצמת ההארה, שהוא היחס המבוקש.

כלומר:

$$\frac{1}{I} \alpha R^2$$

או בצורה המוכרת לנו:

$$I \alpha \frac{1}{R^2}$$

חלק ג: מדידת הספק השמש

מטרת החלק הזה היא להשתמש בחוקי האופטיקה הגיאומטרית ובנתון של מרחק הארץ מהשמש כדי לבצע מדידה פשוטה, שממנה ניתן יהיה להסיק את הספק השמש. נציין כי מדידת המרחק אל השמש נדון בפירוט בהרחבות הפיזיקליות המצורפות לפרק זה. אין צורך להציג את הנושא בפני התלמידים בשלב זה אלא להסביר ששיטות המדידה של מרחקים בחלל יידונו בהמשך, וכעת יש לקבל את המרחק מכדה"א אל השמש כנתון מדעי, שדרך מדידתו תובהר בהמשך.

תיאור הניסוי מופיע בפירוט בחוברת לתלמיד. קיימת בעיה בביצוע הניסוי, שכן הצבע המתקבל מהנורה הוא בעל גוון אדמדם, בעוד שהצבע המתקבל מהשמש הוא בעל גוון בהיר. יש קושי מסוים להשוות בין שני הגוונים. ההבדל נובע מהטמפרטורה השונה של שני מקורות האור. בהנחה ששניהם קורנים קרינת חום (black body radiation), טמפרטורות



הנורה היא בערך 2,300 מעלות קלווין, בעוד שטמפרטורת השמש היא כ-5,800 מעלות קלווין. השוואה בין שתי עקומות אור האחת של 2,300 מעלות והשנייה של 5,800 מעלות מוצגת באיור הבא.

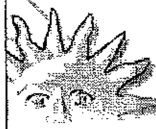
קרינת גוף שחור
ב-5,800 מעלות קלווין

קרינת גוף שחור
ב-2,300 מעלות קלווין

איור 4: השוואה בין הספקטרום של גוף בטמפרטורת השמש (K5,800)
לגוף בטמפרטורת חוט להט (K2,300)

מלבד ההבדלים בעוצמה ההשוואה מראה, שהתחום הנראה הוא בעל העוצמה המרבית בקרינה של 5,800 מעלות קלווין, בעוד שבקרינה של 2,300 מעלות קלווין העוצמה המרבית היא בתחום האינפרה אדום - מבין אורכי הגל בתחום הנראה האור האדום הוא הדומיננטי. זוהי הסיבה להבדלים בין צבעי הנורה לצבעי השמש.

לכן יש צורך לבקש מהתלמידים למרות קושי זה להעריך מתי, להערכתם, העוצמה שווה למרות הבדלי הצבעים בין שני הצדדים.



לפניך סדרה של מדידות שבוצעה על ידי זוג מורים בהשתלמות שהתקיימה בקיץ 1999 במכללת עמק הירדן.

מספר מדידה	המרחק בין הנורה לפוטומטר (בס"מ)
1	49
2	45
3	47
ממוצע	47

טבלה 2: תוצאות של מדידת מרחק הנורה מהפוטומטר המשווה

ניתוח תוצאות המדידה

במדידה זו ניצלנו את העובדה, ששתי עוצמות ההארה שוות, לכן ניתן לטעון כי עוצמת ההארה של השמש שווה לעוצמת ההארה של הנורה I_L

$$I_S = I_L$$

מתוך ידיעת הקשר בין עוצמת ההארה למרחק ממקור האור ניתן לטעון:

$$\frac{P_S}{P_L} = \left(\frac{R_S}{R_L}\right)^2$$

כאשר:

P_S = הספק השמש R_S = המרחק לשמש

P_L = הספק הנורה R_L = המרחק לנורה

נחלץ את הספק השמש P_S ונקבל:

$$P_S = \left(\frac{R_S}{R_L}\right)^2 X\, P_L = \left(\frac{1.5 X 10^{11}}{0.45}\right)^2 X\ 150 = 1.66 X 10^{25}\ watt$$

וזוהי תוצאה הקטנה בסדר-גודל אחד מהספק השמש, שהוא כידוע $4 X 10^{26}$ ווט.
ניתן להסביר את השוני בין הגודל שהתקבל במדידה בהשתלמות המורים, לבין התוצאה המצופה בכמה אופנים.

א. זוהי מדידה סובייקטיבית, שתלויה ברגישות עינו של המודד.

ב. מרבית הקרינה של חוט הלהט היא בתחום האינפרה אדום ולא בתחום הנראה, לכן ההספק החשמלי המנוצל להארה נמוך בהשוואה לאחוז הקרינה של השמש המנוצל להארה.

ג. חלק מקרינת השמש נבלע ומפוזר באטמוספרה ואינו מגיע לפני כדה"א, במיוחד שהמדידה נערכה בגובה 200 מטרים מתחת לפני הים.

ד. השוני בצבעים מקשה על ההשוואה בין עוצמת ההארה של שני לוחות הפוטומטר.



תשובות לשאלות לדיון מסכם

1. עוצמת ההארה של השמש במאדים, בהתחשב בהשפעת המרחק בלבד, קטנה פי:

$$1.5^2 = 2.25$$

לכן גם עוצמת ההארה של הנורה צריכה להיות קטנה בהתאם, כלומר יש להרחיק את הנורה פי 1.5 ממרחקה בכדור הארץ. לכן בהתחשב בתוצאות המדידה שהבאנו, יש להרחיקה למרחק של:

R מאדים = R ארץ 1.5 = 47 X 1.5 = 70.5 ס"מ

2. בדרך דומה לפתרון של השאלה הקודמת הפעם יש להקטין את המרחק בפרופורציה מתאימה, כלומר:

R נוגה = R ארץ 0.7 = 47 X 0.7 = 32.9 ס"מ

3. ההספק הממוצע של צריכת חשמל בישראל הוא 10 GW או 10^{10} וט. בשנה 31 מיליון שניות בקירוב, לכן האנרגיה החשמלית הנצרכת בישראל היא כ-$3 X 10^{17}$ ג'יאול.

4. נניח לצורך החישוב כי כמות האנרגיה הנצרכת ע"י תושבי ישראל היא בסדר-גודל אחד יותר מתושבי מכמות האנרגיה החשמלית שהם צורכים כלומר כ-$3 X 10^{18}$ ג'יאול.

5. מספרם של תושבי כדה"א הוא פי אלף לערך מתושבי ישראל בקרוב 6 מיליארד. לכן פישוט החישוב נניח שצריכת האנרגיה היא פי אלף מזו של ישראל, כלומר כ-$3 X 10^{21}$ ג'יאול.
זוהי הזדמנות טובה לבחון את עמדותינו בשלב "מה דעתך?". במקרה זה תושבי כדה"א צורכים בשנה כאחת חלקי 100,000 מכמות האנרגיה שפולטת השמש בשנייה.



פעילות 4: מדידת קוטר השמש דידקטיקה

מבוא

מטרת פרק זה היא להתמודד עם מדידה של גדלים בחלל. לשם כך יש לנצל את הידע של התלמידים בחוקי האופטיקה הגיאומטרית. הפרק נחלק לארבעה חלקים עיקריים: פעילות מבוא, היכרות עם חריר, מדידת קוטר השמש, דיון מסכם. היכולת לבצע מדידות אסטרונומיות מבהירה עד כמה שונים הגדלים, שאנו מנסים לחקור בשעה שאנו עוזבים את כדה״א.

חלוקת זמנים מומלצת לפעילות זו:

מה דעתך? - 10 דקות.

חלק א היכרות עם נפלאותיו של חריר - 15 דקות.

חלק ב קביעת קוטר השמש - 15 דקות.

ניתוח תוצאות וסיכום - 5 דקות.

מה דעתך?

קוטר השמש הוא גודל בלתי נתפס לשוכני כדה״א הרגילים למדוד את המרחקים במטרים, בק״מ או לכל היותר באלפי ק״מ. ממחקרים שנערכו מתברר שתלמידים רבים יודעים לומר שהשמש גדולה יותר מכדה״א, אך כאשר שואלים אותם שאלות עקיפות המנסות לברר את מבנה השמש או גודלה, הם מעריכים שהשמש דומה בצורתה ובממדיה לכדה״א. קיים פער בין הידע המוצהר לבין הידע שבו מאמינים התלמידים. במקרים רבים מתקשים תלמידים להאמין שהשמש עשויה מחומר במצב צבירה גזי. מטרת ״מה דעתך?״ לברר את עמדות התלמידים לפני תחילת הפעילות. שתי השאלות המופיעות ב״מה דעתך?״ עוסקות בשני הנושאים העיקריים של הפעילות: ממדי השמש, קבלת דמות בעזרת חריר.

1. הטענה מתבססת על מדידת המרחק אל השמש, כפי שמוסבר בנספח הפיזיקלי. ידיעת המרחק לשמש וידיעת היחס בין קוטרה לבין המרחק אליה מאפשרות הערכה של גודלה. ללא ידיעת המרחק אל השמש לא ניתן להעריך את גודלה. בעקבות הערכות לגבי גודלה של השמש ולאחר גילוי חוק הכבידה העולמי בסוף המאה ה-17, ניתן היה לקבל אומדן לגבי מסת השמש.
2. תלמידים רבים נוטים לחשוב שצורת החריר משפיעה על צורת הדמות המתקבלת. לכן יש לשער שחלק משמעותי מתלמידיך יחשבו שהדמות שתתקבל תהיה בעלת צורת משולש. למעשה, אם החריר אכן קטן דיו, מספר מילימטרים, הדמות שתתקבל תהיה בצורת השמש, כלומר עגולה.

לאחר שהתלמידים ענו בדרך אישית על השאלות, יש לקיים דיון קבוצתי, ולאחריו דיון במליאה. הדיון במליאה נועד לסכם את תשובות התלמידים ואת הנימוקים העיקריים לעמדותיהם, ואין להוסיף עליו את דעות המורה או את עמדותיו.



חלק א: היכרות עם נפלאותיו של חריר

פעילות זו מפגישה את התלמיד עם דמות המתקבלת לא על ידי מראה או עדשה, אלא על ידי "התקן אופטי", המעביר רק אלומה צרה מאוד מהאור הנפלט מנורה. לתלמידים שלא התנסו עד עתה בתופעה זו, זוהי פליאה גדולה.

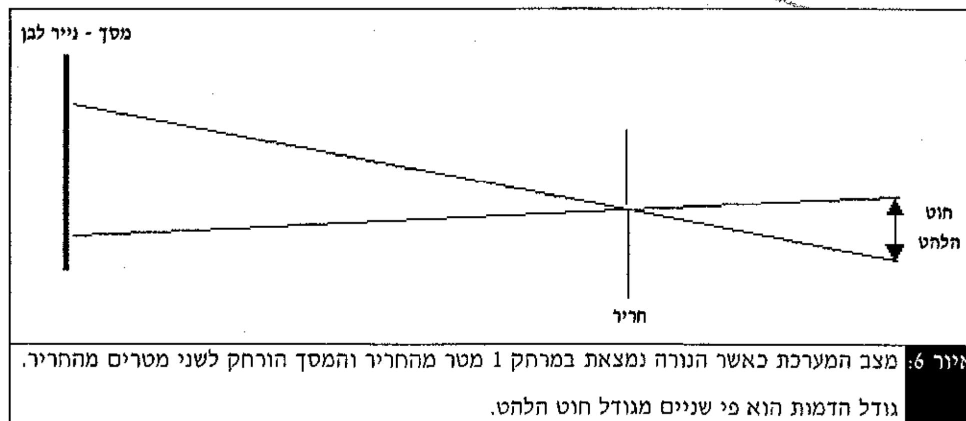
1. תלמידים רבים מעריכים שיתקבל על הנייר הלבן כתם אור עגול, הדומה בצורתו לצורת החריר.
לאחר התארגנות נכונה מופתעים התלמידים לגלות שעל הנייר הלבן התקבל כתם אור הדומה בצורתו לחוט הלהט של הנורה.

2. הדמות המתקבלת נוצרת עקב מעבר אור באלומה צרה. בעזרת דמיון משולשים ניתן להעריך מה יקרה לדמות, כאשר נרחיק את דף הנייר למרחק שני מטרים.



איור 5: מצב המערכת כאשר הנורה והמסך נמצאים במרחק 1 מטר משני צדדיו של החריר. גודל הדמות הוא כגודל העצם חוט הלהט

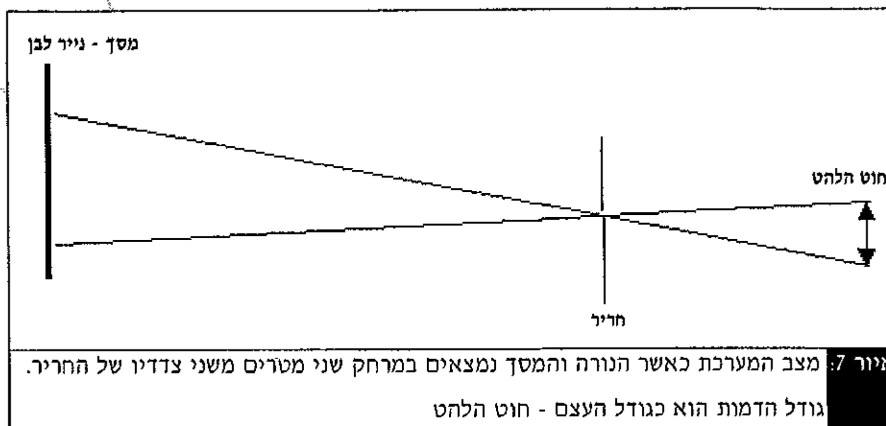
כאשר מרחיקים את הדף הלבן, ניתן להעריך בעזרת תרשים קרניים מה יקרה.



איור 6: מצב המערכת כאשר הנורה נמצאת במרחק 1 מטר מהחריר והמסך הורחק לשני מטרים מהחריר. גודל הדמות הוא פי שניים מגודל חוט הלהט.



3. הרחקת הנורה למרחק שני מטרים גורמת לסימטריה של התמונה, כלומר גודל הדמות שווה לגודל העצם.



איור 7: מצב המערכת כאשר הנורה והמסך נמצאים במרחק שני מטרים משני צדדיו של החריר. גודל הדמות הוא כגודל העצם - חוט הלהט

4. התשובות לשאלות 3-2 ניתנו בעזרת תרשימי קרניים. יש לקוות שהתלמידים מודעים לנושא תרשימי הקרניים, שבעזרתם ניתן לפרש תופעות הקשורות באופטיקה גאומטרית.

5. יצירת דמות בעזרת חריר היא פלא בעיני המתבונן בפעם הראשונה. נורה המאירה קיר לבן אינה יוצרת שום דמות. דווקא ע״י החסרת חלק ניכר מהאור ניתן לפתע ליצור דמות. דיון מפורט בדמות המיוחדת של חריר מופיע בסוף המבוא הדידקטי. הסבר הדמות הנוצרת ניתן בעזרת תרשים קרניים פשוט. היפה הוא בכך שתרשים זה מאפשר להבין את הקשר שבין המרחק של המסך וחוט הלהט מהחריר לבין הפרופורציות של גודל חוט הלהט ודמותו.

6. בדיון הכיתתי רצוי להדגיש את הנקודות הבאות:
   א. יצירת דמות על ידי חיסור אור.
   ב. תרשים הקרניים כאמצעי לפענוח תופעות באופטיקה גאומטרית.
   ג. יכולת הניבוי של תרשים הקרניים.
   ד. דמיון משולשים כאמצעי לבדיקת יחסים בין גודל העצם לגודל הדמות.

שאלות להרחבה

1. ראוי לשנות את נוסח השאלה ולהחליף את המילה **שמש** בצירוף **חוט הלהט**. נוסח השאלה יהיה אם כן ״מה יקרה לדמות חוט הלהט, אם נשנה את צורת החריר לצורה משולשת? התשובה היא שלא יחול שינוי משמעותי, כל עוד החריר קטן דיו, בגודל של מספר מילימטרים.

2. חריר נוסף יגרום להופעת דמות נוספת.

3. יש להניח כי לפחות בשאלה הראשונה חלק מהתלמידים יעריכו שהדמות שתתקבל תהיה בצורת משולש.

4. הצורה של דמות השמש תהיה דמות מרובעת, היטל של דמות השמש הקובייתית על משטח דו ממדי.



חלק ב: קביעת קוטר השמש

מטרת הפעילות למדוד את קוטר השמש בהנחה שהמרחק אליה ידוע. נושא מדידת המרחקים בחלל מטופל בהרחבה בפרק העוסק במדידת המרחק אל הירח. לפרק זה צירפנו נספח המתאר את ההיסטוריה של מדידת המרחק אל השמש. מדידת מרחק זה הייתה הבסיס למדידת מרחקים מחוץ למערכת השמש. כאמור, כאן אנו עוסקים במדידת קוטר השמש על בסיס ההיכרות עם דמות הנוצרת בעזרת חריר.

תיאור הניסוי מוצג בדרך מפורטת בתדריך לתלמיד. חשוב להדגיש שיש להחזיק את דף האלומיניום ואת הדף הלבן בניצב לאור השמש כמצוייר באיור 4 בחוברת התלמיד. ניתן לקבוע את ניצבות הדף בהתאם לגודל הצל שהוא יוצר. כאשר הדף ניצב לאור השמש, שטח הצל הנוצר על האדמה הוא השטח המרבי.

1. במדידה הראשונה, כאשר החריר נמצא במרחק 1 מטר מדף הנייר הלבן, תתקבל דמות בגודל של 9 מ״מ בקירוב.
2. במדידה הראשונה, כאשר החריר נמצא במרחק 1 מטר מדף הנייר הלבן, תתקבל דמות בגודל של 11 מ״מ בקירוב.
3. במדידה הראשונה, כאשר החריר נמצא במרחק 1 מטר מדף הנייר הלבן, תתקבל דמות בגודל של 14 מ״מ בקירוב.

ניתוח תוצאות המדידה

1. חישוב היחס בין קוטר הדמות למרחק שבין החריר לדף הנייר.

מספר מדידה	L מרחק בין חריר לדף הנייר (במ״מ)	D קוטר הדמות (במ״מ)	היחס L/D
.1	1000	9	111.1
.2	1250	11	113.6
.3	1500	14	107.1
ממוצע			110.6

טבלה 3: הקשר בין קוטר דמות השמש למרחק בין החריר לדף הנייר

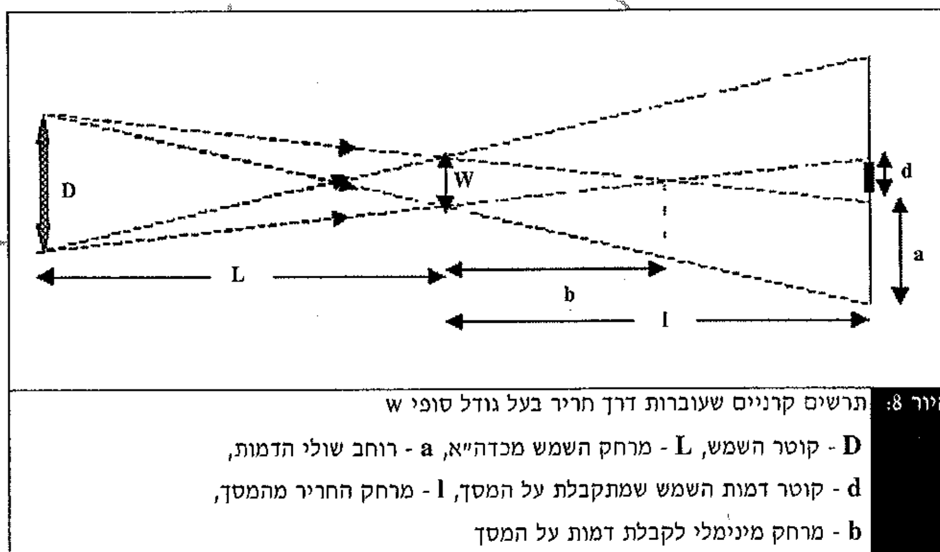
2. תוך הסתמכות על המסקנות מחלק א, העוסק בדמות המתקבלת על ידי חריר, ניתן להעריך שהיחס בין קוטר השמש לבין המרחק אליה הוא כ- 110.6.

3. בהסתמך על התוצאות בסעיף הקודם ניתן להעריך שקוטר השמש הוא המנה של המרחק ביחס 110.6. לפיכך מתקבל שקוטר השמש הוא: 1.35 מיליון ק״מ. תוצאה טובה למדיי בהתחשב באי-דיוקים של מדידה, הנובעים ממגבלות מכשור המדידה (סרגל בעל שנתות מילימטריות). קוטר השמש הוא כ-1.4 מיליון קילומטרים. בעזרת מדידה זו קיבלנו סדר-גודל סביר למדיי. רצוי להשוות גודל זה לקוטר כדה״א. להפתעתנו, נקבל שקוטר השמש גדול פי 110 מקוטר כדה״א. מצב מוזר, בהשוואה למערכת המושגים המוכרת לנו מחיי היומיום.



הרחבה - מדידת קוטר השמש בעזרת מראה

כדי להבין את אופן קבלת דמות השמש על מסך (קיר בניין) בעזרת מראה מישורית ואת המגבלות לגבי הגדלים והמרחקים שמתקבלים, נתבסס על מהלך הקרניים דרך שפופרת חריר, כאשר גודל החריר **W** סופי (החריר אינו נקודתי); המראה המישורית תמלא אז את תפקיד החריר, והדמות **המדומה** של השמש שנוצרת על-ידי המראה תמלא את תפקיד השמש, כפי שניתן לראות באיור 8. (הפרופורציות בתרשים רחוקות, כמובן, מאלו שבמציאות).
תחילה נברר במה תלוי המרחק המינימלי מהקיר, שבו עלינו לעמוד (**b**) כדי לקבל דמות של השמש על הקיר; לאחר מכן נגדיר תנאי לקבלת דמות ברורה, ונבדוק באיזה מרחק (**l**) נוכל לקבל אותה.



איור 8: תרשים קרניים שעוברות דרך חריר בעל גודל סופי w
D - קוטר השמש, **L** - מרחק השמש מכדה״א, **a** - רוחב שולי הדמות,
d - קוטר דמות השמש שמתקבלת על המסך, **l** - מרחק החריר מהמסך,
b - מרחק מינימלי לקבלת דמות על המסך

1. מהו המרחק המינימלי בין הקיר ובין המראה (b), כך שתתקבל על הקיר דמות?

כדי שתתקבל דמות ברורה, גודל השוליים **a** צריך להיות זניח ביחס לגודל הדמות **d**, כלומר צריך להתקיים:

$$(1) \quad a << d$$

התנאי הזה יושג, כאשר מרחק המסך מהחריר (ℓ) יהיה גדול בהרבה מהמרחק המינימלי הדרוש לקבלת דמות על המסך (**b**):

$$(2) \quad \ell << b$$

(רוחב החריר **w** קבוע, וכמובן **D** ו-**L** קוטר השמש ומרחקה מכדה״א קבועים.)



מדמיון משולשים נובע כי היחס בין רוחב החריר w ובין קוטר הדמות d שווה ליחס גובהי המשולשים - $b / (\ell - b)$:

$$\frac{w}{d - a} = \frac{b}{\ell - b} \quad (3)$$

כאשר תנאים (1) ו-(2) מתקיימים, ניתן לכתוב את (3) בצורה הבאה:

$$\frac{w}{d} = \frac{b}{\ell} \quad (4)$$

b הנו, כאמור, הגבול התחתון של הערכים שיכול לקבל l, מרחק המסך מהחריר (או מהמראה המישורית); נבדוק כיצד b תלוי בגודל החריר (או המראה) w.

לפי (4):

$$b = w \times \frac{\ell}{d} \quad (5)$$

מדמיון משולשים:

$$\frac{\ell}{d} = \frac{L}{D} \quad (6)$$

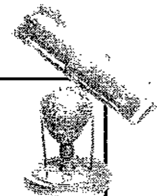
נציב (5) ב-(6):

$$b = w \times \frac{\ell}{D} \quad (7)$$

נציב את הערכים המתאימים עבור השמש, ונקבל:

$$b \approx 110\ w$$

כלומר: מרחק המראה מהקיר צריך להיות גדול פי 110 לפחות מגודל המראה.

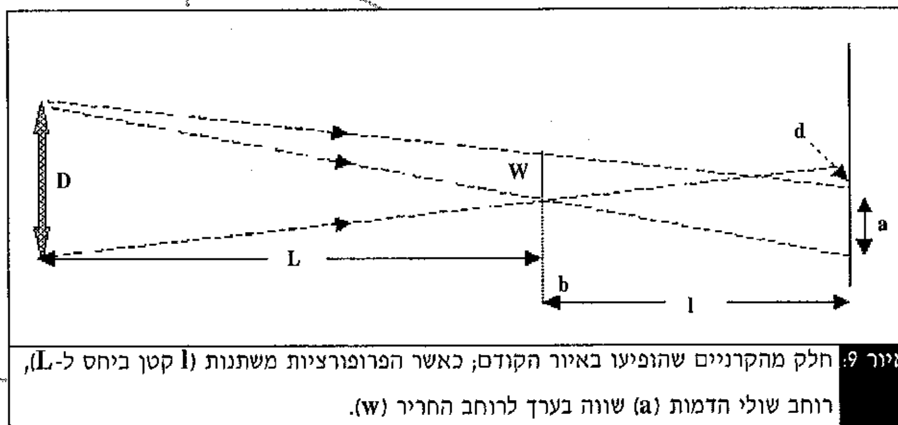


דוגמה: עבור מראה ריבועית שצלעה 4.5 ס"מ,
כאשר מרחק המסך קטן מחמישה מטרים,
מתקבלת על המסך תבנית מוארת שצורתה כצורת המראה;
רק במרחק גדול יותר מתקבלת דמות השמש העגולה.



2. איזה מרחק בין המראה ובין הקיר (l) דרוש, כדי שהדמות שתתקבל תהיה ברורה?

באיור 9 מוצג מהלך הקרניים שעוברות בחריר ויוצרות את דמות השמש בפרופורציות שונות במעט מאלו שבאיור 1 רוחק המסך מהחריר (l) קטן יותר; נראה עתה כי רוחב שולי הדמות (a) שווה בקירוב טוב לרוחב החריר (w), בתנאי ש - $l \ll L$.



איור 9: חלק מהקרניים שהופיעו באיור הקודם; כאשר הפרופורציות משתנות (l קטן ביחס ל-L), רוחב שולי הדמות (a) שווה בערך לרוחב החריר (w).

מדמיון משולשים מקבלים:

$$\frac{a}{w} = \frac{L + \ell}{L} \qquad (9)$$

כלומר:

$$a = w \times \frac{L + \ell}{L} \qquad (10)$$

התנאי לקבלת דמות ברורה הוא שגודל הדמות (d) יהיה לפחות כפול מגודל השוליים (a)

$$d \geq 2\,a \qquad (11)$$

כלומר:

$$d \geq 2\,w \qquad (12)$$

או:

$$\frac{d}{w} \geq 2 \qquad (13)$$

מה יהיה אז מרחק המסך מהמראה?

לפי (5) ו-(8):

כלומר: $l = b \times \frac{d}{w} > 110\ w \times 2 \approx 220\ w$



הרחבה פיזיקלית

1. מדידות אסטרונומיות

א. מדידת קוטר השמש - היסטוריה

מתי הצליחו אנשים להעריך את המרחק אל השמש?
למרחק זה חשיבות רבה בהבנת גודל היקום בו אנו נמצאים, מקומנו ביקום זה ויכולתנו להעריך את חשיבותנו. בסקירה זו נתחיל בתקופה היוונית. האסטרונומיה נחשבה לאחד משני תחומי המדע החשובים ביותר בעיני היוונים. הפילוסוף הידוע אריסטו, בן המאה הרביעית לפני הספירה, והאסטרונום היווני תושב אלכסנדריה תלמי, בן המאה השנייה לספירה, הניחו שהארץ נמצאת במרכז היקום. ממדי היקום שלהם היו קטנים לפי מושגינו היום. יקומו של תלמי היה הגדול יותר, רדיוסו נאמד ב-80 מיליון ק״מ בערך.

אחת הסיבות לכך שהדגמים הראשונים של היקום היו זעירים נגרמה מהתפיסה הגאוצנטרית, שאילצה אותם להיות זעירים. הטיעון שהנחה אותם היה שאם הארץ קבועה במקומה והיקום כולו נע מסביבה, הרי שאחת ליום חייבת קליפת הכוכבים להשלים סיבוב סביב צירה. ככל שרדיוס הכדור המסתובב גדול יותר, נובע כי מהירות הכוכבים גדולה יותר. אילו היה רדיוס הכוכבים גדול יותר, מהירות הכוכבים הייתה גבוהה במידה לא סבירה גם על דעתם של מדעני העת העתיקה.
למרות הדעה השלטת בקרב המשכילים היוונים, שלפיה הארץ נמצאת במרכז היקום, היו שקמו לערער עליה ולהציע חלופות. הבולט מביניהם היה אריסטרכוס, שדגל בקוסמולוגיה ההליוצנטרית, המעמידה את השמש במרכז. גישתו זו קדמה לגישת קופרניקוס בכ-1,700 שנה. אריסטרכוס בן סמוס, אי מיוער ליד חוף אסיה הקטנה, טען כי השמש גדולה ומרוחקת מאתנו פי תשעה-עשר יותר מהירח. מסקנותיו היו שגויות מהבחינה המספרית. למעשה, השמש מרוחקת מאתנו פי ארבע-מאות מאשר הירח. אולי בשל מסקנתו על גודלה של השמש הגיע אריסטרכוס למסקנתו על מרחקה מאתנו.

אולם אי-אפשר לעמוד על התפתחות התאוריה שלו, כי הספר שבו הציג את התאוריה ההליוצנטרית אבד. אנו יודעים עליו מתוך מאמר שכתב ארכימדס בשנת 212 לפני הספירה. במאמרו ״מונה החול״ תיאר ארכימדס את תפיסתו ההליוצנטרית של אריסטרכוס (לא מתוך הסכמה עם תאוריה זו, אלא כדי להשתמש בממדיה לצורך אחר). ארכימדס חישב על סמך נתוניו של אריסטרכוס כי המרחק אל ספרת הכוכבים הוא שנת אור אחת. היום ידוע כי שנת אור אחת אינה אלא כרבע המרחק מהכוכב הקרוב ביותר. זו הייתה תוצאה מדהימה לזמנה. דגם הליוצנטרי שמחוגו גדול מיקומו של תלמי פי מאה אלף. והוא תואר 400 שנה לפני הולדת תלמי! אילו היטה העולם אוזן, היינו מדברים על המהפכה האריסטרכית, לא על המהפכה הקופרניקית, ומעולם המדע היו נחסכות אלף שנים של הליכת שולל.

קופרניקוס נולד ב-1473 בצפון פולין לתקופת לבלוב הרנסנס ולתקופת הדפוס, שהומצא 30 שנה לפני הולדתו ואפשר הפצה במהדורות רבות של הספרים החשובים מהעת העתיקה. קופרניקוס התעמק בספרי המדע מהעת העתיקה



וב"אל מגסטי" של תלמי, וגילה כי המערכת התלמאית אינה פועלת היטב. בספרו "על הסיבובים" (De Revolution) הציג קופרניקוס חלופה לתפיסת העולם התלמאית, ההשערה ההליוצנטרית. הוא השתכנע שכוכבי-הלכת צריכים לנוע במעגלים מושלמים סביב השמש. הנחה זו לא עלתה בקנה אחד עם התצפיות, וייתכן שזו הסיבה שגרמה לעיכוב בהוצאת ספרו המפרסם ברבים תאוריה זו. סיבה אחרת לעיכוב הופעת הספר הייתה החשש המוצדק של קופרניקוס מפני עמדת הכנסייה, שאותה הכיר היטב, שהרי היה נזיר קתולי. קופרניקוס קבע במדויק את ממדיהן היחסיים של מסילות כוכבי-הלכת. הוא לא הצליח למדוד את מרחקי הפלנטות מהשמש, אך פיתח שיטה למדידת המרחקים היחסיים. לכן אילו נתאפשרה מדידתו בפועל של אחד מרדיוסי המסלולים, היו כל השאר מתקבלים מאליהם. ובכלל זה גם מסילת כדה"א, כלומר מרחקו של כדה"א מהשמש.

ארבע שנים לאחר מותו של קופרניקוס ב-1543 נולד טיכו ברהה בדנמרק. טיכו ברהה, גדול האסטרונומים התצפיתיים של המאה השש-עשרה, התווה את מקומות כוכבי-השבת ואת נתיבי כוכבי-הלכת, לילה-לילה, במשך יותר מעשרים שנה. הנתונים שנצברו כך היו מדויקים כפליים ומעלה מאלה שנצברו עד ימיו, די מדויקים כדי לפענח צפונותיה של מערכת השמש. אלא שטיכו היה איש התצפית ולא איש התאוריה. לאחר שגלה ממולדתו, התיישב ברהה בפראג. ב-4 בפברואר 1600 התייצב בטירת בנטק שליד פראג יוהן קפלר, איש תאוריה שהפך את לוחותיו של טיכו לתאוריה יחידה, מדויקת ופשוטה. טיכו וקפלר החלו את עבודתם המשותפת, אך טיכו לא נחפז לחשוף בפני קפלר הצעיר את קלפיו והטיל עליו לפתור את חידת מאדים. מקומו בשמים של מאדים נקבע בדיוק נמרץ ביותר בשל קרבתו אל הארץ. הוא חשף יותר מכל כוכב-לכת אחר את מגרעותיהם של הדגם התלמאי והקופרניקני במסלולו המיוחד. קפלר בחן את תנועתו של מאדים במשך כעשר שנים. בינתיים ב-24 באוקטובר 1601 מת טיכו, וקפלר נתמנה ליורשו בתפקיד המתמטיקאי הקיסרי. הוא המשיך בחיפושיו אחר תאוריה יחידה ופשוטה שתסביר את תנועת מאדים. קפלר כתב: "שגיאתי הראשונה הייתה נעוצה בהנחתי כי המסילה שבה נעים כוכבי-הלכת היא מעגלי". קפלר ויתר על רעיון המעגל המושלם והתקדם לעבר הפתרון או מה שקרוי כיום "חוקי קפלר".

1. צורת מסילתו של כוכב-לכת אינה מעגלית, כפי שחשבו היוונים וקופרניקוס לפניו, אלא **אליפסה**, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיה.
2. המחוג המתבר בין השמש לכוכב-הלכת מכסה בזמנים שווים שטחים שווים.
3. החזקה השלישית של מרחק הפלנטה מהשמש נמצאת ביחס ישר לריבוע זמן הקפתו את השמש.

כעת בשלו התנאים למציאת מרחק כדה"א מן השמש על-פי היחסים שנקבעו במדויק בתצפית על מאדים ונוגה ותוך הנחות נוספות.

ב-15 בפברואר 1564, עשרים שנה אחרי פרסום ספרו של קופרניקוס "על הסיבובים", נולד גלילאו בפיזה שבאיטליה. בימיו הומצא הטלסקופ, והוא שכלל אותו והיה האסטרונום הראשון שהפנה אותו אל הכוכבים. גלילאו פרסם את תצפיותיו לראשונה במארס 1610 בספרו "שליח הכוכבים". קפלר שכבר היה ידוע כאסטרונום המעולה בעולם הביע את תמיכתו הנלהבת ב"שלית הכוכבים" וסייע בכך בבלימת הביקורת שכוונה אל גלילאו בעקבות הספר. גלילאו דיווח לעולם על ירחי צדק, המכתשים על הירח, טבעות שבתאי, מופעי הנוגה, כוכבים נוספים בשמים ותגליות נוספות. הוא נאבק עם הכנסייה הקתולית על נכונותה של תורת קופרניקוס, הכנסייה מחרימה את "על הסיבובים" של קופרניקוס, וגלילאו מוזהר מפני הגנה על התאוריה ההליוצנטרית. בסופו של דבר גלילאו נשפט בפני הכנסייה ברומא וגזר-דינו מעצר-בית לכל ימי חייו. ב-1642 מת גלילאו בביתו, ובדיוק בשנה זו נולד ניוטון אייזיק בלינקולנשייר.



ניוטון מגלה שורה של חוקי טבע, וביניהם את חוק הכבידה העולמי. הודות לחוק הכבידה ניתן להסביר את התנועות האלה ולנבא אותן על-פי מתכונת דינמית תקפה מבחינה מתמטית, שחבקה את הפיזיקה השמימית. המרחקים היחסיים אל השמש וכוכבי-הלכת היו מובנים היטב, אך לא המרחקים המוחלטים. קופרניקוס מדד את הפרופורציות של מערכת השמש עם סטייה של 5% מהערכים הנכונים, קפלר התקרב לאמת עוד יותר ממנו. מכוח המסורת בוטאו המרחקים היחסיים במונחי המרחק מהארץ לשמש, גודל הקרוי יחידה אסטרונומית. אבל ערכה של היחידה האסטרונומית טרם נקבע. קביעת המרחק אל השמש או אל כל כוכב-לכת אחר הייתה מסייעת בקביעת יתר המרחקים במערכת השמש. מדידת המרחק הייתה מאפשרת גם את קביעת גודלן של הפלנטות שאת קוטרן הנראה ניתן היה למדוד בדיוק רב תוך שימוש בעינית מיקרומטרית שהוצמדה לטלסקופ משוכלל.

אומדן המרחקים הממוצעים של כוכבי הלכת מהשמש (ביחידות אסטרונומיות)

	קופרניקוס	קפלר	המאה העשרים
כוכב חמה	0.3763	0.389	0.387
נוגה	0.7193	0.724	0.723
ארץ	1	1	1
מאדים	1.5198	1.523	1.524
צדק	5.2192	5.2	5.202
שבתאי	9.1743	9.510	9.539

שתי שיטות היו מקובלות למדידת מרחקים:

1. שיטת המיקרומטריה השיטה התבססה על השוואת היחס שבין קוטרו הנראה של כוכב עם הקוטר האמיתי שלו. את קוטרו האמיתי קבע האסטרונום על-פי ניחושיו. נקל לשער את מידת הדיוק במדידה זו.
2. שיטת הפרלקסה - פרלקסיס ביוונית ערכה של זווית. אם שני אסטרונומים צופים בכוכב-לכת בעת ובעונה אחת משתי נקודות שהמרחק ביניהן מגיע לאלפי קילומטרים, ייראה מקומו של כוכב-הלכת על רקע שדה הכוכבים שונה במקצת לעיני שני האסטרונומים. אם אפשר למדוד את הזווית הזו ואת קו הבסיס המפריד בין שני האסטרונומים, אפשר לחשב בדייקנות את המרחק לכוכב-הלכת תוך שימוש פשוט בגאומטריה של אויקלידס. לפרלקסה היה בסיס תיאורטי איתן, אבל היה צורך לדעת בדיוק את המרחק בין שתי נקודות התצפית, ולשם כך היו נחוצות מפות בין-יבשתיות מדויקות ביותר. היה צורך לבצע את המדידות בעת ובעונה אחת כדי לנטרל שגיאות הנובעות מסיבוב כדה"א סביב צירו ומתנועת כוכבי-הלכת. לשם כך היו נחוצים שעונים מדויקים ביותר.

בסוף המאה השבע-עשרה חלה התקדמות רבה בתחום שרטוט המפות בשל הצורך בהן במסעות הימיים, כמו-כן שופרו שעוני המטוטלת. ב-1672 בדקה משלחת בינלאומית בראשות האסטרונום הצרפתי ז'אן רישר את הפרלקסה



של מאדים. הוא הפליג לקיין שבחוף אמריקה הדרומית, שם צפה רישר במאדים, שנמצא במרחק הקרוב ביותר לכדה"א. מדידה מתואמת נעשתה באדמיה הצרפתית ממנה באו. הנתונים פוענחו, וערכה של היחידה האסטרונומית נקבע **כמאה וארבעים מיליון ק"מ**, כאשר המספר הנכון הוא 150 מיליון ק"מ.

נוגה מגיעה קרוב יותר לכדה"א מאשר מאדים, ולפיכך מדידת הפרלקסה שלה צריכה להיות יותר קלה, אלא שבהתקרבה היא מתמזגת בזוהר השמש. פעמיים בצמד אירועים, שפחות ממאה שנה מפרידות ביניהם, עוברת נוגה במישרין לפני השמש. אז היא נראית כמעגל שחור על רקע דיסקת השמש.
את המרחק אל נוגה אפשר יהיה למדוד אם בשתי נקודות תצפית המרוחקות זו מזו ייקבע המועד המדויק של כניסת נוגה לדיסקת השמש או יציאתה ממנה. מדענים שונים החמיצו את זוגות המעברים שנוגה ביצעה אם מפני שנולדו לפרק-הזמן, שבו נוגה אינה מבצעת את המעברים ואם בשל קשיים אחרים: עננות וקשיים טכניים אחרים.

משלחת בראשות המדען ג'וזף בנקס הייתה אחת מהמשלחות המשוכללות שיצאו לצפות במעבר הנוגה. היא הפליגה מפלימות ב-26 באוגוסט 1768 בראשותו קפטן ג'יימס קוק, נווט מומחה, מודד ימי ומתמטיקאי שלמד בעצמו אסטרונומיה. קוק ובנקס הקימו בטהיטי מצודת מצפה במקום שנקרא מאז כף נוגה, וממנה נצפה המעבר ב-3 ביוני 1769 בשמים כחולים, נקיים מענן.

קביעת מועד המעבר של נוגה התגלתה כבעייתית. לנוגה אטמוספרה סמיכה, השוברת ומפזרת את אור השמש בעת שהוא עובר דרכה, משום כך דיסקית כוכב נוגה לא נראית חדה בעת המעבר, ולכן לא ניתן לקבוע חד-משמעית את רגע הכניסה לדיסקה. בין שתי נקודות התצפית נתגלע הבדל של עשרים שניות. על אף ההבדל הניבו הנתונים שנאספו אומדן למדידת מרחק הארץ מהשמש, שאינו סוטה ביותר מעשרה אחוזים מהערך הנכון. לימים נמדדה היחידה האסטרונומית בדיוק רב יותר על-ידי מדענים, ששרטטו משולשים מדומים משוכללים יותר ויותר אל נוגה בעת מעבריה במאה התשע-עשרה, אל מאדים כשהיה בניגוד ב-1877 ואל עשרות אסטרואידים, כשאלה עברו על פני כדה"א.

כיום מודדים את המרחק אל הפלנטות על-ידי שידור אות רדאר אל הפלנטה לנקודה הנמצאת על קו הראייה של המשדר. מחשבים את המרחק שהקרן עברה לפי מכפלת המהירות בזמן ומחלקים בשתיים.

ב. שיטת הפרלקסה

שיטת המדידה של מרחקים במערכת השמש מבוססת על שיטת הפרלקסה. בשיטה זו נקבע המרחק של פלנטה בעזרת כוכב מרוחק יותר. כיצד ניתן היה למדוד את המרחק אל השמש בשיטת הפרלקסה? כאשר השמש מאירה, לא ניתן לצפות בגרמי-שמים אחרים (למעט הירח), בשל עוצמת הקרינה של השמש. לכן יש צורך לבצע מדידה עקיפה של פרלקסת השמש. המדידה תישען על שני שלבים:

א. מדידת זווית הפרלקסה ומאפייני המסלול (אקסצנטריות, זמן סיבוב סביב השמש ביחס לכוכבים T - siderial period) של גוף שלישי (פלנטה או אסטרואיד) במערכת השמש.
ב. שימוש בחוק השלישי של קפלר כדי למצוא את יחס $a / a_{\circ}$, ובעזרתו לחשב את הפרלקסה האופקית של השמש $P_{\circ}$.



לפי החוק השלישי של קפלר:

$$\left(\frac{a}{a_o}\right)^3 = \left(\frac{T}{T_o}\right)^2$$

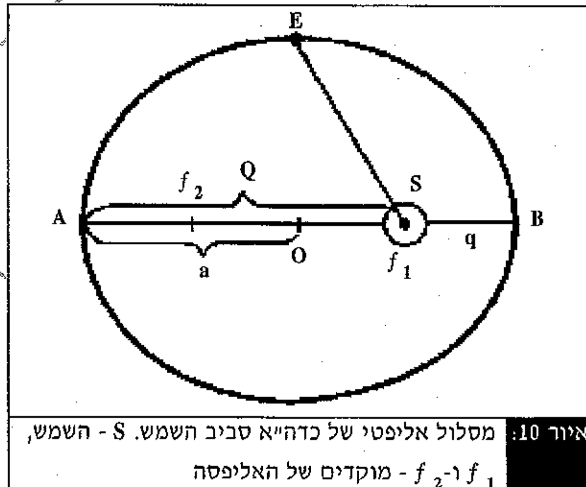
כאשר:

a_o =. 1a .u = מרחק הארץ מהשמש.

T_o = זמן סיבוב של כדה"א סביב השמש, הערך המקובל 366.2422 ימים.

ג. יחידות במדידת מרחקים באסטרונומיה

יחידות המרחק המקובלות בפיזיקה הארצית מטר וקילומטר אינן מתאימות כאשר אנו עוברים למדידת מרחקים במערכת השמש. יחידות המרחק המקובלות במערכת השמש נשענות על "יחידה אסטרונומית" (astronomical unit), שמציינת את המרחק הממוצע בין כדה"א לבין השמש. כאשר עוברים למדידת מרחקים בין כוכבי הגלקסיה, יש להשתמש ביחידת מרחק חדשה פרסק (parsec), שמציינת את היחס שבין גובה משולש, שזווית הראש שלו היא שנית קשת אחת לבין הבסיס שלו, שגודלו יחידה אסטרונומית אחת.



איור 10: מסלול אליפטי של כדה"א סביב השמש. S - השמש, f_1 ו-f_2 - מוקדים של האליפסה

במילים אחרות, זהו המרחק של גוף שהפרלקסה שלו היא שנית קשת אחת, כאשר צופים בו משתי נקודות שהמרחק ביניהן הוא יחידה אסטרונומית אחת.

$$1\ par\ sec = \frac{360 \times 60 \times 60}{2\ \pi}\ a.\ u. \approx 206265\ a.\ u.$$

כיצד מגדירים יחידה אסטרונומית?

נוכחנו בחשיבות הרבה במדידות מדויקות של יחידה אסטרונומית. לשם כך אנו זקוקים להגדרה ברורה של יחידה אסטרונומית, מפני שהמרחק בין השמש לבין כדה"א משתנה ללא הרף בגלל אליפטיות המסלול של כדה"א. באיור 10 מוצג מסלול של כדה"א סביב השמש. ניתן לאפיין את המסלול האליפטי בעזרת המרחק בין שני מוקדי האליפסה **f1** ו-**f2** ואורך הציר הגדול **AB = 2 a**.

אקסצנטריות של אליפסה e מוגדרת בעזרת היחס:

$$e = \frac{Of_1}{OB}$$



נקודות A ו-B על מסלול כדה"א E (או פלנטה אחרת הסובבת סביב השמש) מסמנות את המרחק הגדול ביותר מהשמש במסלול האליפטי (Q) ואת המרחק הקטן ביותר במסלול (q).
ניתן לקבוע את ערכם של המרחקים הקיצוניים בעזרת הקשרים:

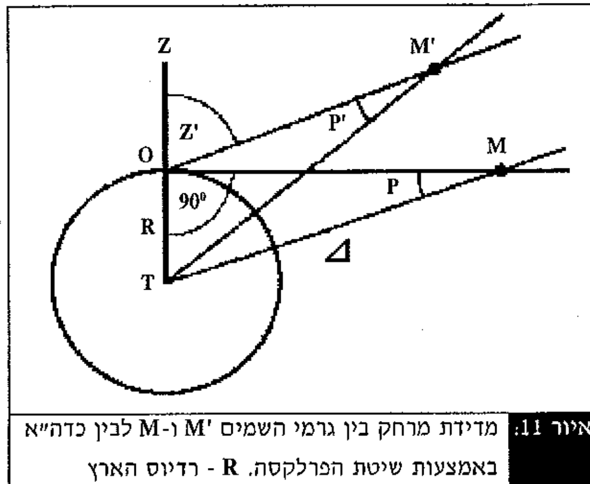
$$q = a \times (1 - e) \qquad Q = a \times (1 + e)$$

היחידה האסטרונומית מוגדרת כמרחק ממוצע בין השמש לבין כדה"א:

$$a = \frac{q + Q}{2}$$

מדידת מרחקים בשיטת הפרלקסה

על מנת למדוד מרחק בין כדה"א לבין גוף כלשהו במערכת השמש, משתמשים בשיטת פרלקסה. זווית הפרלקסה 'P נוצרת בין שני הכיווני תצפית אל גרם השמים 'M משתי נקודות שונות על פני כדה"א (איור 11). נהוג לבחור בתור הכיוונים הללו את קו הראייה 'OM של תצפיתן ואת הקו המחבר בין ה-'M לבין מרכז של כדה"א T. במקרה זה זווית 'P נקראת פרלקסת-יממה. מהאיור נובע, כי זווית הפרלקסה תהיה מקסימלית (P), כאשר הגורם M ייראה ליד האופק ממקום התצפית O. הזווית המקסימלית P נקראת פרלקסה אופקית.



איור 11: מדידת מרחק בין גרמי השמים 'M ו-M לבין כדה"א באמצעות שיטת הפרלקסה. R - רדיוס הארץ

מתוך המשולשים 'TOM ו-TOM מקבלים:

$$\frac{R}{\Delta} = \frac{\sin p'}{\sin z'} \qquad \frac{R}{\Delta} = \sin p$$

מכאן:

$$\sin (p') = \sin (p) \times \sin (z')$$

פרלקסות אופקיות של גופים במערכת השמש קטנות. לדוגמה, פרלקסה של הירח '57, פרלקסה של השמש "8.79 פרלקסות של פלנטות קטנות מ-'1. לכן בנוסחה האחרונה ניתן להחליף את sin p ו-'sin p בזוויות p ו-'p (הנמדדות ברדיאנים): $p' = p \sin z'$

כאשר הרדיוס של כדה"א והפרלקסה האופקית של השמש ידועים, ניתן לחשב את המרחק בין השמש לבין כדה"א (איור 12). דיוק החישוב כולו נקבע על-ידי דיוק המדידה של זווית הפרלקסה. אך בגלל רוחק השמש וסטיות גדולות הנוצרות בזמן תצפית, כאשר טלסקופ מתחמם על-ידי קרינת השמש, אי-אפשר להגיע לדיוק סביר במדידה ישירה של פרלקסת השמש.



מבוא

האסטרונומיה היא אחת מנקודות המפגש בין המוכר ללא נודע. תופעות שנראות יומיומיות, ולכן מובנות מאליהן הופכות למפתח אל ממדים אחרים של חשיבה. השמש הנעה ממזרח למערב בכל יום מספקת הזדמנות לשאלות רבות הקשורות לתנועתה, לצבעיה, למועדי הזריחה והשקיעה, למרחק שלה מכדה"א, לגודלה, לטמפרטורה שלה, למקור האנרגיה שבה, לדרך שבה אורה מגיע אלינו. במקרים רבים יש לאנשים הצופים בשמש, גם אם אינם מדענים, השערות ביחס לשאלות אלה. חלקם משוכנעים בעוצמת תשובותיהם, שהרי הן "ברורות כשמש". לפני שנתיים הוצאנו חוברת פעילויות באסטרונומיה, שבה ניתנה הזדמנות לתלמידים לבחון את עמדותיהם בשאלות הקשורות לתופעות יסוד באסטרונומיה. החוברת נלמדה בעשרים כיתות ניסוי, ועל בסיס הערות ומפגשים עם מורי הניסוי נכתב המדריך למורה.

רק בשנים האחרונות החלו להופיע בישראל חוברות לימוד באסטרונומיה, הפותחות צוהר אל עולם שניתן לצפות בו בלי לגעת בו. המייחד את חוברת הפעילויות שהוצאה על-ידינו היה ניסיון לנצל את חוקי היסוד של האופטיקה לצורך חקירת התופעות האסטרונומיות. הגמישות המחשבתית מאפשרת לנו להכליל חוקים שהתגלו במעבדה, שבה הדברים נמדדים בסדר־גודל אנושי, ליקום העוטף אותנו, שבו הכול נמדד בגדלים אסטרונומיים. הניסיון לחבר בין החוקיות הפיזיקלית לבין המראה הראשוני של השמים עשוי לחלץ אותנו ממעגל החשיבה היומיומי, שבו הבדור מאליו מנצח. ניסיון לשבור את מעגל השגרה, בדומה לסיפור על הילד המאורי, שדודו הבטיח לו בומרנג חדש, אם יצליח לזרוק את הבומרנג הישן שלו לפח הזבל, והילד עדיין מנסה.

פיתוח החוברת לתלמיד נעשה במקביל להשתלמויות מורים, שבהן הצגנו את הדרך הדידקטית של הוראת הנושא, לצד הרצאות העשרה. הנחות-היסוד שלנו בהוראת החומר נשענות על הגישה הקונסטרוקטיביסטית. אנו מניחים:

1. לתלמיד יש עמדות פתיחה בכל התופעות האסטרונומיות והאופטיות המוכרות לו.
2. יש צורך לתת לתלמיד הזדמנות להביע את עמדות הפתיחה שלו, לפני שמתחילים את תהליך הלימוד.
3. עולם המושגים המדעי שהולך ונבנה בכיתה, נשען על דיאלוג בין הידע הראשוני לידע ההולך ומתפתח.
4. תפקיד המורה להיות מתווך בין תלמידי הכיתה לידע המדעי. המורה עורך סיכומים של הבנות שאליהן הגיעה הכיתה, מעודד כיווני חשיבה חדשים, מזהה סתירות בין עמדות ומצביע עליהן, נותן מקום לשאלות חדשות שלא זכו למענה, מאפשר דיון וחילוקי-דעות, מעודד הסקת מסקנות, מכליל ידע קונקרטי ועוד. מאידך המורה צריך להימנע מהצגת עמדה סמכותית שבה נכפית דעתו בשל חוכמתו או ידיעותיו הרבות.
5. תהליך הלמידה צריך לזמן פעילות, שבה נבחנות עמדות הפתיחה של התלמיד מול תוצאות הניסוי. ניסוי המוליד סתירה בין הידע הראשוני וההשערות הנובעות ממנו לבין המציאות כפי שהיא מתגלה בפעילות החקר.
6. קיימת חשיבות רבה לדיון הכיתתי הבא בעקבות הניסוי, שבו ניתן הזדמנות להצגת עמדות שונות, שברובן נאמרות בשפה שאינה מנוסחת במדויק, אך מצביעה על כיווני חשיבה חדשים, שאותם אפשר הניסוי.

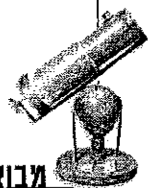
במפגש בין מורי הפיזיקה לאסטרונומיה ולשיטת הלימוד שאותה הצענו, זיהינו כמה קשיים. ראשית, האסטרונומיה עבור התלמידים הייתה נושא מלהיב ומעורר סקרנות, מאידך למורים לא הייתה הכשרה מדעית לכך. מורים רבים שהתפעלו מיפי האסטרונומיה וזיהו את חשיבותה, היו במצב שבו לא הרשו לעצמם לגשת לנושא כל-כך רחב, בלי שעברו קורס או השתלמות. בחרנו ללמד אסטרונומיה בכיתה י' כדי ליהנות מזמן שבטרם לחצי הבגרות. כדי לאפשר למורים שהחליטו ללמד את הנושא לצאת, לדרך הזמנו אותם להשתלמות בשני נושאים עיקריים: כיצד מלמדים בדרך משמעותית, שבה התלמיד עומד במרכז? אסטרונומיה מקצוע הנלמד מתוך חוויה ופיתוח חשיבה.



מבנה המדריך

המדריך למורה בנוי משמונה פרקים. בכל פרק מתוארות שתיים עד ארבע פעילויות, שיש ביניהן קשר של תוכן ורקע פיזיקלי. בתחילת כל פרק מופיע תיאור דידקטי של דרכים שונות, שבהן ניתן להעביר את הפעילות. החלק השני של הפרק כולל הרחבות פיזיקליות המהוות הרחבה. תקוותנו שהמדריך למורה יאפשר למורה להגיע לשיעורים עם שוליים רחבים דיים, גם אם לא עבר קורסים אקדמיים באסטרונומיה.

מס' פרק	שם הפרק	פעילויות	הרחבות בפיזיקה
.1	תנועת השמש	תנועת השמש יומן שקיעות	מודל שני הכדורים, עונות השנה, התנועה היומית של הכוכבים, התנועה השנתית של השמש, התנועה השנתית של הכוכבים, גלגל המזלות, אזורי זמן, שינוי קצב תזוזת נקודת השקיעה. סוגי זמן.
.2	הספק השמש וקוטרה	קוטר השמש הספק השמש	האנרגיה בשמש, מעברי אנרגיה בשמש, איזון בשמש, משוואה הידרוסטטית, מדידת קוטר שמש, ומרחק לשמש בשיטה של מעבר נוגה ופלנטת חמה לרוחב השמש, הסבר על קבלת דמות בעזרת מראה קטנה.
.3	מופעי הירח ושעון הירח	מופעי הירח שעון הירח	ליקויי חמה, ליקויי לבנה, מסלול הקפה ארצי, מסלול הקפה משולב, פני הירח, מופעים של פלנטות אחרות (פנימיות וחיצוניות), הצד האפל של הירח, כוחות גאות ושפל מופעי הירח
.4	המרחק לירח	המרחק לירח גודל זוויתי	מדידת המרחק לשמש בעזרת המרחק לירח, מדידת המרחק לשמש בעזרת הנוגה, מדידת מרחק לכוכבים בעזרת פרלקסה, יחידת מרחק פארסק.
.5	הטלסקופ	כושר ההפרדה שפופרת חריר טלסקופ תכונות הטלסקופ	השפעת גודל החריר על הדמות, השפעת גודל החריר על כושר ההפרדה, מבנה הטלסקופ, כושר הגדלה, שדה ראייה בטלסקופ
.6	אטמוספרה	השמש השוקעת צבע השמים	מבנה האטמוספרה, אינטראקציה של אור ואטמוספרה, פיזור ובליעה באטמוספרה
.7	מערכת השמש	ארץ, ירח, שמש בניית מודל מערכת השמש	תיאור מערכת השמש, פלנטות, ירחים, שביטים, אסטרואידים
.8	חום וצבע	ספקטרום קרינת חום מדידת טמפרטורת כוכבים	ספקטרוסקופיה של חומרים, תהליכי זיהוי של חומרים בכדה"א, סוגי ספקטרומטרים, חוק פלאנק.



מטרות התכנית

מטרות על

1. **יצירת חוויה לימודית אישית**, שיש עמה התמודדות בין דעות ראשוניות לבין מסקנות המתגלות תוך כדי בדיקה וניסוי.
2. **יצירת חוויה לימודית כיתתית**, שבה נבנה עולם מושגים חדש באסטרונומיה תוך בירור ויצירת הסכמות בכיתה.
3. **פיתוח כשרים של חקירה והסקת מסקנות** תוך ביצוע פעילות שבה ניתן להעמיד במבחן דעות ראשוניות.
4. **פיתוח יכולת הפשטה**, מעבר ממערכת מושגים הקשורה למקום ולנוף מוגדר אל מערכת מושגים הקשורה לפלנטה נעה במערכת שמש, וממנה צופים אל העולם.
5. **היכרות עם גרמי השמים, והממדים הפיזיקליים שלהם** תוך שימוש בחוקי האופטיקה הגאומטרית.

מטרות בתחום הידע

1. היכרות עם מערכת המושגים של **הגישה הגאוצנטרית**, הנשענת על התנועה היומית של השמש הירח והכוכבים.
2. היכרות עם מערכת המושגים של **הגישה ההליוצנטרית**, הנשענת על השוואה בין מופעי הירח למופעי נוגה.
3. **איסוף נתונים תצפיתיים, ניתוחם ובניית מודלים**, שמסבירים אותם ותופעות נוספות, שלא נצפו בתחילה.
4. ניצול חוקי **האופטיקה הגאומטרית** כדי לבצע מדידות של גרמי שמים כגון: קוטר השמש, המרחק אל הירח, שקיעת השמש.
5. ניצול חוקי **האופטיקה הפיזיקלית** כדי להבין ולחקור תופעות כגון: צבע השקיעה, צבע השמים, זיהוי יסודות לפי הספקטרום, מדידת טמפרטורה מרחוק.
6. היכרות של סדרי-גודל של **גופים במערכת השמש** והבנה של תנועותיהם והמרחקים ביניהם.

כיצד לשלב פעילויות באסטרונומיה עם תכנית הלימודים באופטיקה לכיתה י'?

בכתיבת התכנית הנחנו שהיא תתבצע בשילוב עם לימודי האופטיקה בכיתה י'. ניתן לבצע את הפרקים הראשונים של התכנית גם ללא ידע מסודר באופטיקה גאומטרית, כך שניתן לשקול את הוראתה גם בכיתות ט'.

האסטרונומיה היא מדע הנשען על רבים מחוקי הפיזיקה, בעיקר על חוקים הקשורים לתופעות בתחום האופטיקה והמכניקה. בשלבים מתקדמים יותר של הלימוד, כאשר עוסקים בהיבטים של התפתחות כוכבים והתפתחות היקום נוספים היבטים שונים של מבנה החומר הנשענים על פיזיקה מודרנית.



למעשה, האסטרונומיה יכולה ללוות את לימודי הפיזיקה לאורך כל התיכון. הפעילויות בחוברת זו מאפשרות לתלמידים היכרות עם מושגים ראשוניים באסטרונומיה.

בפרק זה נסקור את הדרך, שבה הפעילויות מתקשרות אל נושאים הנלמדים באופטיקה, ונמליץ על עיתוי אפשרי לשילובן ברצף הלימוד. ההמלצות אינן באות במקום שיקול-הדעת של המורה, העוסק בהכנת רצף הלמידה, אלא נועדו לסייע לו. נשמח לקבל הערות נוספות על אלה המופיעות כאן.

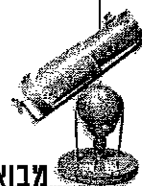
בתכנון סדר הפעילויות יש לשים לב להתפתחות הידע בשני תחומי הדעת: אופטיקה ואסטרונומיה. באשר לרצף הלימוד באופטיקה, אנו מניחים שהמורים מכירים את הנושא ויכולים לתמרן בדרך הצגתו. לימודי האסטרונומיה דורשים התמודדות עם רצף של הנחות אינטואיטיביות ביחס למבנה העולם, למרכזיותו של כדה״א, לגודלה של השמש, למקור האור של הכוכבים ועוד. במדריך למורה העומד לצאת לקראת סוף 2000, נרחיב בנושא התפתחות הידע באסטרונומיה. נציג דרך לימוד המאפשרת התפתחות ידע ומעבר מערכות מושגים אינטואיטיביות למערכות מושגים מדעיות.

בפיתוח הפעילויות נקטנו את הכלל של חקירת המוכר והידוע, והתקדמות אל הרחוק והבלתי מוכר תוך הסתמכות על הידוע. לכן הפעילויות הראשונות עוסקות בחקירת השמש והירח. בהמשך התלמיד חוקר את השפעת האטמוספרה על אור המגיע מהשמש פעם אחת בהקשר לצבע השמש בשקיעה, ופעם שנייה ביחס לפיזור ולצבע השמים. כדי להרחיק ולחקור את מבנה היקום אנו פונים אל בניית טלסקופ פשוט והיכרות עם תכונותיו. רצף הפעילויות הסוגר את המהדורה הנוכחית עוסק בנושא הקשור לספקטרום הכוכבים. ברצף פעילויות זה התלמיד חוקר את הקשר בין טמפרטורה של גוף לבין הקרינה שהוא פולט. תוך הסתמכות על הידע שנאסף במעבדה הארצית התלמיד פונה להיכרות עם ספקטרום כוכבים ולהבנה כיצד ניתן לנצל אותו לקביעת הטמפרטורה של הכוכבים.

בחוברת הפעילויות ערכנו אותן בהתאם להיגיון פנימי של לימודי האסטרונומיה. אולם בשל הצורך לשלב פעילויות אלה עם לימודי האופטיקה ניתן לחשוב גם על רצף שונה מן הרצף המוצע בחוברת. רצף אשר יתחשב יותר בהיגיון הפנימי של לימודי האופטיקה. בדרך-כלל אין סתירה בין שני רצפי הלימוד, אך מסגרת הזמן המקובלת של לימודי האופטיקה הגאומטרית, שלוש שעות שבועיות, אינה מאפשרת לבצע את כל הפעילויות המוצעות. לכן נדרש שיקול-דעת של המורה בבחירת הפעילויות שאותן יביא לכיתה.

כדי להקל במידה מסוימת את ההתלבטות של המורה בבחירת הפעילויות, שאותן יביא לכיתה, סיווגנו את הפעילויות לשלושה סוגים:

1. **פעילויות פתיחה** - פעילויות הדורשות ידע בסיסי באופטיקה, ובלעדיהן קשה לבנות בסיס מושגי מסודר באסטרונומיה. פעילויות אלה הן המינימום, שהיינו ממליצים ללמד במהלך השנה.
2. **פעילויות הרחבה וביסוס** - פעילויות שבהן הרקע המתמטי או הידע הפיזיקלי הנדרש חורג לעתים מתכנית הלימודים הבסיסית באופטיקה. מומלץ מאוד לשלב חלק מפעילויות אלה בתכנית הלימודים, במיוחד בכיתות שבהן קצב הלמידה טוב.
3. **פעילויות מתקדמות** - פעילויות אלה חורגות מתכנית הלימודים המקובלת באופטיקה. הן נועדו לכיתות, שבהן יש מוכנות של התלמידים והמורה להתמודד עם נושאים מורכבים מעט יותר, המאפשרים הבנה של תופעות חשובות באסטרונומיה כגון: מדידת מרחקים בחלל או קביעת טמפרטורה של כוכבים והרכבם.



פעילויות פתיחה

פעילויות הפתיחה הן פעילויות, שרצוי לא לוותר על ביצוען בשילוב עם לימודי האופטיקה. הן נשענות על ידע בסיסי באופטיקה, הקשור לחוקיות של התפשטות האור בקווים ישרים וההבנה החוקית של ראיית עצמים. נושאים אלה נלמדים בשיעורים הראשונים באופטיקה. בהמשך נשענות הפעילויות על תרשימי קרניים ועקרון קבלת דמות.

1. מעקב אחרי התנועה היומית של השמש - פעילות המביאה לידי ביטוי את ההבנה של עקרון קבלת הצל וניצול מתחכם שלו בקביעת מיקומה של השמש בכיפת השמים. פעילות פשוטה המאפשרת להבהיר את מורכבות היחסים שבין תנועת השמש לתנועת הארץ. מומלץ להתחיל בפעילות זו כפעילות ראשונה באסטרונומיה.
2. מודל מופעי הירח - נשען על ידע בהתפשטות האור וההחזרה שלו אל עין הצופה. המודל המוצע מאפשר להתמודד עם שגיאות מקובלות ביחס לתנועת הירח והמופעים המשתנים שלו. ניתן להביא פעילות זו מיד לאחר דיון בתופעת הצללים, מקורות האור, והתנאים לראיית עצם.
3. שעון הירח - מבהיר את הקשר בין שלושה גורמים: מיקום הירח בכיפת השמים, מופע הירח והזמן. פעילות באסטרונומיה הנשענת על הפעילות הקודמת, חשובה לתחושת התמצאות וסדר ביקום. היא מחזקת את הגישה הגאוצנטית, שתוחלף בעתיד בגישה ההליוצנטרית.
4. צבע השמים - פעילויות העוסקות בנושא פיזור האור באטמוספרה. הידע הנדרש באופטיקה קשור להיכרות עם ספקטרום האור, נפיצה ושבירה. יש מקום לשלב פעילות זו לאחר לימוד הנושאים הללו בכיתה.
5. שפופרת חריר - חקירה של קבלת דמות בעזרת שפופרת חריר. ההיכרות באופטיקה הנדרשת היא היכרות עם תרשימי קרניים והבנת עקרון קבלת הדמות. פעילות זו יכולה להיות פעילות פתיחה לכל נושא עקרון קבלת הדמות.
6. בניית טלסקופ אסטרונומי פשוט - פעילות המאפשרת לתלמידים לבנות טלסקופ פשוט ולחקור את תכונותיו. הידע הנדרש באופטיקה קשור בעדשות ובעקרון קבלת דמות על-ידי עדשה. שילוב הפעילות מתאים במסגרת הפרק העוסק במכשירים אופטיים.
7. יחסי ארץ-ירח-שמש - פעילות המאפשרת בניית מודל פשוט של היחסים שבין גודל ומרחק של שלושת הגופים המוכרים ביותר במערכת השמש. אינו דורש ידע מוקדם באופטיקה. בפעילות זו יש להתחשב ברצף הלימוד באסטרונומיה.
8. מודל מערכת השמש - בנייה של מודל תלת-ממדי של מערכת השמש. מאפשר להבין מהם המרחקים, שעמם נדרש האדם להתמודד בבואו לחקור את הסביבה האסטרונומית הקרובה. הפעילות אינה דורשת ידע מוקדם באופטיקה.



פעילויות הרחבה וביסוס

הפעילויות המוצעות כאן יכולות לשפר את הבחנת התלמיד בין תופעות פיזיקליות לתופעות אסטרונומיות. הן מחזקות את הידע ואת מיומנויות הלמידה שנרכשו בפעילויות הפתיחה. בתכנון רצף הלמידה יש להתייחס אל בניית מערכת המושגים באופטיקה מחד ובאסטרונומיה מאידך. הידע המתמטי הנדרש בפעילויות אלה אינו חורג מפתרון משוואות ממעלה ראשונה והתמודדות עם דמיון משולשים.

1. יומן שקיעות - פעילות זו היא הרחבה של הפעילות בנושא התנועה היומית של השמש. הפעילות צריכה להתבצע בגיחות קצרות לאורך כחודשיים כדי לצפות בשינוי משמעותי במיקום השמש ביחס לקו האופק. בתכנון רצף הלמידה, אם בחרתם לשלב אותה, רצוי להציג את התדריך לפעילות זו סמוך לתחילת השנה. התלמידים יבצעו תצפיות אחת לשבוע-שבועיים, ויציגו את תוצאות התצפיות לאחר כחודשיים מתחילת ביצוען.

2. מדידת קוטר השמש - בפעילות זו מתמודדים התלמידים עם עקרון קבלת דמות בעזרת חריר. נושא זה נדון ביתר הרחבה בפעילות שפופרת חריר. אם בחרתם לעסוק בפעילות זו לפני הפעילות בנושא "שפופרת חריר", תישען הלמידה על הבנה איכותית יותר של קבלת הדמות. פעילות זו מתקשרת בהמשך אל בניית המודל של ארץ-ירח-שמש בניית מודל מערכת השמש ופעילות באסטרונומיה הנשענת על תרשים קרניים והבנת עקרון קבלת הדמות.

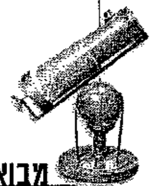
3. גודל זוויתי - פעילות זו מאפשרת לתלמיד לשנות עמדה ביחס לפיזור גרמי השמים. רבים מהתלמידים מתייחסים אל השמים לפי מודל "שני הכדורים". לפי מודל זה כדה"א ניצב במרכז היקום ועוטף אותו כדור גרמי השמים. היכרות עם מושג הגודל הזוויתי מאפשרת לתלמיד להכיר את ממד העומק. הפעילות קושרת בין התופעה הארצית של שינוי הגודל הזוויתי של עצם עם התרחקותו מהצופה לבין התופעה שאותה עובר הצופה בגרמי השמים, בבואו להעריך את גודל העצמים שבהם הוא צופה. ניתן למצוא קשר בין פעילות זו לבין ההסבר על פעולת זכוכית מגדלת.

4. בדיקת כושר ההפרדה - פעילות זו מאפשרת לתלמיד לבחון את כושר ההפרדה של עיניו. בדרך זו הוא עורך היכרות עם מושג חשוב. כושר ההפרדה יידון שוב, כאשר נאפיין את תכונות הטלסקופ. מומלץ לשלב את הפעילות בתכנית הלימודים בהקשר ללימוד תכונות הטלסקופ.

5. חקר תכונות אופטיות של הטלסקופ - הפעילות מאפשרת לתלמיד לבחון חלק מיתרונותיו ומגבלותיו של הטלסקופ בהשוואה לעין האנושית. בפעילות זו נבחנים שלושה היבטים: כושר ההפרדה, שדה ראייה וכושר איסוף אור. ניתן לשלב את הפרק למהלך הדיון באופטיקה על מכשירים אופטיים.

6. צבע השמים בשקיעה - פעילות העוסקת בשינוי צבעי השמש בזמן הזריחה והשקיעה. בהמשך הפעילות נדונה גם תופעה מיוחדת של ההבזק הירוק. הפעילות נוגעת בנושאים הקשורים לשבירה, לפיזור, לספקטרום, לנפיצה. ניתן לשלבה לאחר לימוד נושאים אלה באופטיקה.

7. מציאת קו-רוחב - הפעילות עוסקת במציאת קו-הרוחב של הצופה ע"י תצפית בכוכב הצפון בעזרת "סקסטנט" פשוט. פעילות זו מתקשרת אל מושג הגודל הזוויתי מחד ואל התמצאות תצפיתית בשמים מאידך. העיתוי של שילוב פעילות זו בכיתה תלוי בעיקר ברצף לימוד האסטרונומיה.



גילוי פלנטה - הפעילות מאפשרת להתמודד עם השאלה מדוע במשך אלפי שנים היו מוכרות למין האנושי רק חמש פלנטות. מאידך במשך כ- 150 שנה, החל מסוף המאה ה- 18 ועד תחילת המאה ה-20, התגלו שלוש פלנטות נוספות. הדיון נשען על מושגים הקשורים בעוצמת ההארה ובכושר ההפרדה. מומלץ לבצע את הפעילות לאחר הפעילויות עם הטלסקופ.

פעילויות מתקדמות

פעילויות אלה נועדו לכיתה, שבה יש תלמידים הששים להתמודד עם אתגרים לימודיים, שיש בהם הבנה של חומר ברמה גבוהה יותר מהמקובל. יש לשקול שילוב פעילויות אלה בהתאם למטרות הלימוד שהציב לעצמו המורה, יכולת התלמידים וקצב הלמידה המתאים לתלמידי הכיתה.

1. מדידת הספק השמש - פעילות המאפשרת הערכה של כמות האנרגיה שפולטת השמש בכל שנייה. הפעילות נשענת על העיקרון של שינוי עוצמת ההארה ביחס הפוך למרחק בריבוע. בפעילות התלמידים מאירים "פוטומטר משווה" ע"י שני מקורות אור: נורת להט והשמש. במצב של עוצמת אור שווה ניתן להעריך כמה נורות צריכות להאיר, כדי שהאור שייפלט מהן יהיה שווה להספק השמש. ניתן לשלב פעילות זו מיד לאחר לימוד המושגים: עוצמת ההארה, ותלות עוצמת הארה במרחק ממקור אור נקודתי.

2. מדידת המרחק אל הירח - הפעילות מפגישה את התלמיד עם מושג הפרלקסה. בתחילה לומד התלמיד על התופעה במסגרת המעבדה. לאחר מכן הוא בוחן את התופעה בהקשר לירח. הפעילות דורשת הפעלת שיקול-דעת בניתוח ממצאים אסטרונומיים.

3. ספקטרומטר כמזהה מקורות אור - פעילות המאפשרת לתלמיד לבחון את הקשר בין "צבע" מקור האור לבין ההרכב הספקטרלי שלו. באמצעות הספקטרום ניתן להבחין בין מקורות אור שונים. בסיום הפעילות נבחן הספקטרום של כוכב והתלמיד עורך היכרות עם המושגים: ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה. הפעילות מומלצת לאחר היכרות עם מושג הסריג והאופי הגלי של האור.

4. קרינת חום - התופעה של קרינת חום איננה קשורה ללימודי האופטיקה המסורתיים. לדעתנו, ראוי להציג תופעה זו לאחר היכרות עם האופי הגלי של האור. בדרך זו ניתן לקשר בין תופעה ארצית לבין תופעה שמימית. ניתן להתייחס לקרינה שפולטים כוכבים, בסדר ראשון, כקרינת חום. מומלץ לשלב פעילות זו לאחר הפעילות הקודמת.

5. חוק וויין - היכרות עם חוק וויין מאפשר לתלמיד ליצור קשר בין ספקטרום של גוף הקורן קרינת חום לבין הטמפרטורה שלו. חוק זה שהתגלה במעבדה ארצית, מיושם בהצלחה גם במעבדה הקוסמית שבה אנו צופים. באמצעותו ניתן לקבוע טמפרטורה של כוכבים. מומלץ לשלב פעילות זו לאחר הפעילות העוסקת בקרינת חום.



ביצוע התכנית בחטיבת-הביניים

חלק מהפעילויות המופיעות בתכנית "אסטרונומיה בפעולה", יכולות להילמד כבר בחטיבת-הביניים. רצוי, כמובן, שהמורה יעבור השתלמות מתאימה ויכיר את הרקע הפיזיקלי של הפעילויות. הפעילויות שניתן ללמדן בחטיבת-הביניים הן שבע פעילויות הפתיחה. משך ההפעלה של תכנית זו הוא 25-20 שעות. בדרך זו יכולה התכנית להוות מודל של לימוד בתחום מדעי כדה"א.

טבלה מסכמת

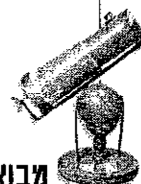
בטבלה שלפניך מופיע סדר הפעילויות המומלץ. במרבית המקרים יש קשר תוכני בין הפעילות לבין הנושא הנלמד באופטיקה. אך במקרים בודדים מופיעה המלצה לפעילות בשל שיקולים של רצף הלמידה באסטרונומיה ללא תלות ברצף הלימוד באופטיקה.

פרק לימוד באופטיקה[1]	פעילויות פתיחה	פעילויות הרחבה וביסוס	פעילויות מתקדמות
פרק מבוא	תנועת השמש	יומן שקיעות מדידת הספק השמש	
ההחזרה	מופעי הירח שעון הירח	מדידת קוטר השמש	מדידת המרחק לירח
שבירה/פיזור		צבע השקיעה	
עדשות		גודל זוויתי כושר ההפרדה	
מכשירים אופטיים	שפופרת חריר בנית טלסקופ	חקר תכונות אופטיות של טלסקופ	
המודל החלקיקי	ארץ-ירח-שמש	מציאת קו-רוחב	
המודל הגלי	מודל מערכת השמש	גילוי פלנטה	
התאבכות ועקיפה באור	צבע השמים		ספקטרומטר קרינת חום חוק וין

טבלה המסכמת המלצות לשילוב פעילויות באסטרונומיה עם לימודי האופטיקה

המדריך למורה שבידך הוא למהדורת ניסוי, לכן יש חשיבות רבה לכל הערה שתמצא לנכון להאיר בה את עינינו, כדי שנוכל לשפרו לקראת המהדורה הבאה. נשמח לקבל הערות מכל סוג שהוא החל בהערות לשוניות, עבור להערות דידקטיות, שיטות למידה או דרכי למידה שונות מאלה המוצעות בו, וכמובן שגיאות שונות, שלא הצלחנו לשים לבנו אליהן. זוהי הזדמנות נעימה להודות לעשרות מורי הניסוי, שעבדו עמנו במהלך השנתיים שבהן מופעל הניסוי.

1. לפי תכנית הלימודים של קבוצת הפיזיקה במכון ויצמן.



פרק א': תנועת השמש



פעילויות 2, 1:

התנועה היומית של השמש, מעקב אחרי שקיעת השמש - דידקטיקה

מה דעתך?

הגישה שבה נכתב חומר הלימוד בחוברת היא הגישה הקונסטרוקטיביסטית, שלפיה התלמיד אינו מגיע לכיתה כלוח חלק, אלא יש לו עמדות בנושאים שונים הקשורים לחומר הנלמד. אי-אפשר ולא רצוי להתעלם מעמדות אלה. ניסיון להתחיל ללמד ללא התייחסות אל עמדות התלמידים עלול ליצור מצב, שבו הם יחושו זרים לחומר הלימוד. קיימת גם אפשרות שהם יפתחו שתי מערכות של התייחסויות: מערכת הנשענת על הניסיון הקודם שלהם ומערכת אחרת הקשורה ללימוד בכיתה. בדרך-כלל תלמידים נוטים לשכוח את מה שלמדו בכיתה ולזכור אותם דברים, שלמדו תוך התנסות עצמית. שלב זה מנסה למנוע את התופעה של שתי מערכות התייחסות ולאפשר לתלמיד להציג את דעותיו כחלק חשוב מתהליך הלימוד, המתמקד בתהליכים שעובר התלמיד, ולא רק בחומר הלימוד.

במקרה של תנועת השמש יש בוודאי לכל תלמיד אמונות ושערות לגבי תנועת השמש. אמונות אלה נשענות על התנסות יומיומית במפגש עם השמש. אולם מרביתם לא התעכבו לחקור את הנושא בצורה שיטתית. לכן זהו שלב חשוב בכל הפעילויות, ובפעילות זו באופן מיוחד. זוהי ההזדמנות של הלומד להציג את עמדתו לגבי תנועת השמש, תהליך שבלעדיו חיפוש דרכי הפתרון לשאלה, הדיונים המתלווים אליו והלמידה עצמה יהיו פחות משמעותיים. אנו ממליצים לחלק את השלב הזה לשלושה חלקים: הראשון הוא אישי, ובו קובע כל תלמיד את עמדתו ללא שיחה או התייעצות עם חבריו. השני הוא דיון בתוך הקבוצה ובו חברי הקבוצה מנסים להגיע להסכמה, לפני שהם מסמנים את המסלול על הכיפה. החלק השלישי הוא דיון כיתתי ובו תציג כל קבוצה את עמדתה.

מומלץ שהמורה יציג את השאלה בפני הכיתה (גם אם היא מופיעה בחוברת לתלמיד) בעזרת כיפה שקופה ודף בסיס, ואת הדרך לבטא את ההשערה. יש להבהיר כיצד לחבר את דף הבסיס, כיצד לסמן את הכיוונים, ואיך להעביר את הקו המתאר את תנועת השמש. יש להדגיש כי העלאת ההשערה בשלב זה היא אישית, ואין לנהל דיונים.

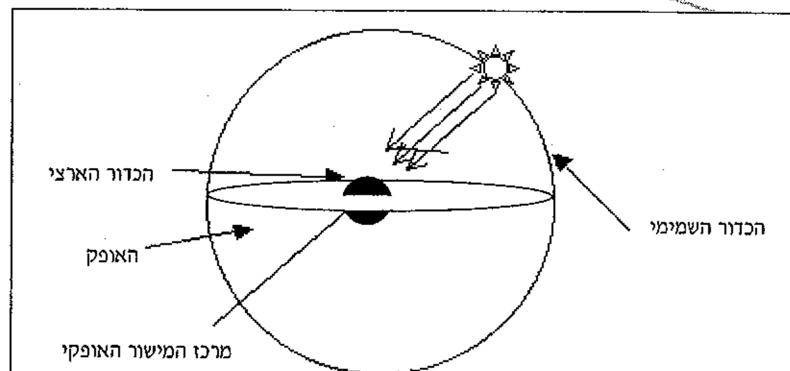
לאחר שהמורה מוודא **שכל תלמיד** סימן את הקו, שמייצג את השערתו על הכיפה, יציג כל תלמיד את הכיפה שלו בפני הקבוצה, בצירוף הסבר קצר. רצוי שצורת הישיבה בכיתה תאפשר הצגת הכיפה ממקום הישיבה, למשל ישיבה בצורת "ח", ניתן להזמין את התלמיד לעמוד לפני הכיתה ולהציג את עמדתו. תלמידים רבים נוטים להציג עמדה שלפיה השמש נעה בדיוק ממזרח למערב. זוהי גישה מוטעית הנשענת על תיאורים לא מדויקים המצויים בספרות ובלשון. גישה זו מתארת את השמש זורחת במזרח ושוקעת במערב.

כיצד מתמודדים עם גישות מוטעות? מורים רבים נוטים להסביר הסברים שונים, הנשענים על מושגים שאותם פיתחו במהלך שנות למידה רבות. בדרך-כלל המפגש בין ההסבר המלומד של המורה לבין מערכת המושגים של התלמיד אינו מוליד הבנה עמוקה. תלמידים רבים יאותו להסכים עם המורה, אך לא יפנימו את הסבריו וימשיכו להאמין כי כיוון תנועת השמש הוא כפי שהם סברו. המחקר בהוראת המדעים מצביע על כך שכדי לשנות תפיסה שגויה יש צורך בהתנסות אישית, המעידה את התפיסה המוטעית בסתירה לתוצאה ניסויית. במצב שבו התפיסה המוטעה מובילה למסקנות הסותרות את התוצאות הניסיונית, קיים עימות בין עמדות התלמיד לבין הניסיון המלווה בתחושה של אי-נוחות, שעשויה להיפתר אם התלמיד יאמץ גישה שונה מזו שנקט. שינוי זה יתרחש לא על רקע הפעלת סמכות, אלא בעקבות התנסות אישית, ולכן יש סיכוי שיהיה משמעותי יותר.

בדיון המקדים, כאשר התלמידים מציגים את השערותיהם ביחס לתנועת השמש, עולות השערות שונות. מטבע הדברים, העיניים מופנות אל המורה שישפוט מי צדק. הפעם נתגבר על הצורך העז שלנו להסביר ונצא לפעילות כדי לאפשר לטבע לומר את דברו.

ביצוע הפעילות

למרות שהפעילות קלה ופשוטה לביצוע, ההסבר של דרך המעקב אחרי תנועת השמש בכיפת השמים בדרך-כלל מעורר קשיים, ולא אחת הוא דורש הסבר. לא ברור לחלק מהתלמידים מדוע סימון של נקודה מסוימת על הכיפה מייצג את מקומה היחסי בשמים. ההסבר לכך דורש התבוננות משתי נקודות-ראות: הסתכלות מקומית והסתכלות ארצית או אפילו אסטרונומית נתחיל דווקא בהסתכלות אסטרונומית, המנסה להבין את מבנה העולם. הכיפה מהווה מודל מוקטן של כיפת השמים. במידה מסוימת יש כאן אימוץ של המודל האריסטוטלי, "מודל שני הכדורים". לפי מודל זה, כדור הארץ נמצא במרכז היקום ועוטפת אותו כיפת שמים, כאשר גרמי השמים נעים על כיפה זו. תלמידים שלא הפנימו מודל זה או פיתחו מודלים אחרים, עשויים להציג שאלות ולתמוה מדוע השמים דווקא בצורת כיפה. ניתן להשיב לתלמידים המציגים שאלות מסוג זה, כי המודל לפיו אנו מבצעים את הפעילות הוא מודל זמני, וייתכן שנשנה מודל זה בהמשך הפעילות. כדי להבין את שיטת המדידה יש להתייחס לשתי סקלות: האחת היא הסקלה של מודל שני הכדורים, שממדיו הם כממדי המרחק שבין השמש לכדור הארץ, כמאה חמישים מיליון ק"מ; הסקלה השנייה היא של הדגם שלנו, שממדיו הם כעשרים ס"מ. המעבר מסקלה אחת לשנייה אינו פשוט למי שלא רגיל בכך.



איור 1: מודל היקום האריסטוטלי יקום שני הכדורים.
במרכז מישור האופק שבו אנו עומדים, צופים אל השמש ומודדים את מיקומה

שגיאה אחרת המיוצגת בקו תנועת השמש שניבאו התלמידים, קשורה בכיוון מסלול התנועה של השמש. תלמידים רבים סבורים שהשמש צריכה לנוע רק בחלק הדרומי של כיפה ובמסלול הקצר ביותר ממזרח למערב. תוצאות אלה משתנות, כאשר מבצעים את הניסוי בתקופה שבין השוויון הסתווי (21.9) לבין השוויון האביבי (21.3). בתקופה זו בפרק-הזמן שסמוך לזריחה ופרק-הזמן הסמוך לזריחה השמש נמצאת בחלק הצפוני של הכיפה. מקורה של שגיאה זו הוא, כנראה, בתיאור תנועת השמש שלפיה השמש בצהריים נמצאת בדרום, ולכן לא סביר שהיא תתחיל את מסלולה בחלק הצפוני של כיפת השמים.

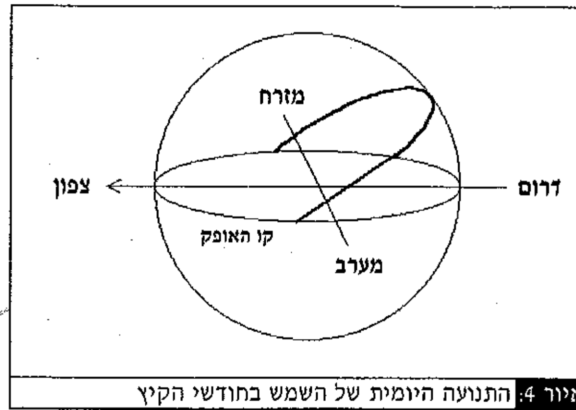
רצוי להקדיש זמן להשוואה שבין הניבויים לבין התוצאות שהתקבלו. יש ערך רב לבחון מדוע ציירו התלמידים את מסלול תנועת השמש באופן שונה מכפי שהתקבל בתוצאות הניסוי. שיחה על כך עשויה להשאיר את התלמידים בהרגשה שהם אינם "חסרי ידע", אלא שיש להם ידע רב, אך לעתים הוא קרוב יותר לידע אינטואיטיבי או בידע פולקלורי, שאינו מתאים ולעתים אף מנוגד לידע המדעי. המפגש שבו התלמיד מציג את עמדותיו בתחילת הניסוי ואת התוצאות שהתקבלו, מעמיד אותו במצב של עימות, שבו יש צורך להחליט איך להתייחס לשתי עמדות שונות. למרות שנראה כי "האמת המדעית" חזקה יותר מ"האמת הפולקלוריסטית", מתברר שבמקרים רבים אין זה כך. תלמידים יהיו מוכנים להיכנע לאמת המדעית, אך לא לוותר על האמת הפולקלוריסטית. כלומר, לצורך הדיון הם יקבלו את התוצאות שהושגו, אך בסתר לבם לא יוותרו על האמת הידועה להם מסיפורי הילדות. הדיון בכיתה מאפשר מצב, שבו הם אינם בודדים עם הרגשה שקיים פער בין המחשבה המוקדמת לבין התוצאות המושגות בניסוי. ומאחר שתופעה זו מתאימה לתלמידים רבים, מותר גם להם להיות במצב זה. במהלך ההיסטוריה של המדע גילו מדענים רבים שהתוצאות שאספו עומדות בסתירה למה שהאמינו כ"אמת מדעית". רק בודדים העזו לשנות את עמדתם ולוותר על אמונתם. חלק מהמדענים שזכו לתהילה, הם דווקא אלה שהעזו לשנות את עמדתם בעקבות תוצאות ניסויות שהתקבלו.

מורים שהעבירו פעילות זו, העדיפו לחזור ולבצעה שלוש פעמים במהלך שנת הלימודים: בסתיו בראשית שנת הלימודים, בחורף ובאביב. הדבר מאפשר לדון במספר נושאים הקשורים להשפעת מסלול התנועה של השמש על החיים על פני כדור הארץ, על העונות, על משטרי האקלים, על עוצמות ההארה בעונות השונות, על השפעת מיקום קו-הרוחב על הדרך שבה נראה מסלול תנועת השמש ועוד. נציג כעת מספר נושאים שניתן, לדעתנו, לשלב בעת הדיון על התוצאות שהתקבלו.

היבטים נוספים והרחבות פיזיקליות

1. המחזור היומי של תנועת השמש

החוויה המחזורית הבסיסית של האדם היא המחזוריות של יום ולילה. נראה שזריחת השמש ושקיעתה דומות, מדי בוקר וערב. כדברי קוהלת: "וזרח השמש, ובא השמש, ואל מקומו שואף, זורח, הוא שם. הולך אל דרום וסובב אל צפון..." (קוהלת א' 5-6). אולם מעקב שיטתי אחרי תנועת השמש מגלה שתנועתה היומית מורכבת מכפי שנוטים אנשים לחשוב. בפעילות שביצעו התלמידים, רבים מהם מופתעים לגלות שהשמש אינה זורחת בדיוק במזרח ואינה נעה דרך הזנית אל אופק מערב. תנועתה היומית מורכבת יותר.

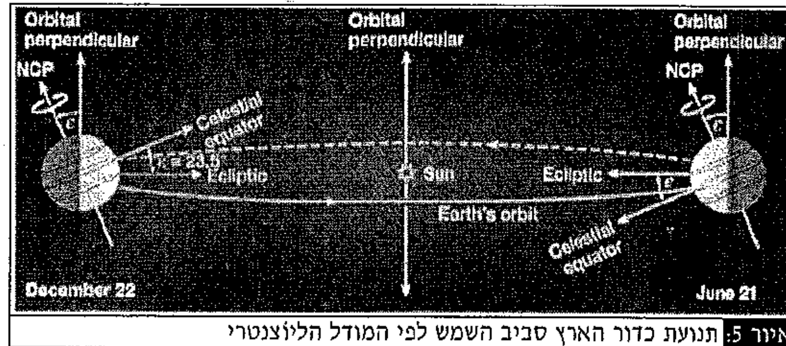


איור 4: התנועה היומית של השמש בחודשי הקיץ

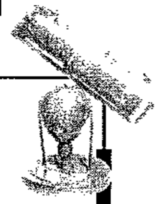
כיצד ניתן להסביר תנועה זו?

נראה כי המודל הפשוט ביותר הוא דווקא המודל הגאוצנטרי הרואה את כדור הארץ במרכז היקום ואת הצופה ניצב במרכז האופק. בהתאם למודל זה השמש סובבת סביב כדור הארץ בתנועה יומית שאינה פשוטה במיוחד, אך יחד עם זאת ניתן לעקוב אחריה. מתברר כי שלמה המלך צדק בחלק מתיאור תנועת השמש. לצד התנועה הברורה ממזרח למערב קיימת תנועה נוספת - מנקודת הזריחה השמש נעה בתחילה דרומה, ומשעת הצהריים היא סובבת ומתחילה לנוע צפונה. הסבר זה אינו מציג אלא ידע תצפיתי בלבד, בלי שנוצר מודל המבהיר את תנועת השמש.

המודל של תנועת השמש המקובל נשען על מודל הליוצנטרי, הקובע שכדור הארץ נע סביב השמש. למרות שזהו מודל הנוגד את האינטואיציה, הרי שהוא מקובל על התלמידים. למרות זאת הם אינם מקשרים בין המודל ההליוצנטרי לבין תוצאות הניסוי שערכו זה עתה. זוהי הזדמנות טובה להציג בפניהם את המודל ההליוצנטרי. הפעם ייתכן שתובן הסיבה לכך שבמודלים רבים של כדור הארץ נוטה ציר הסיבוב ב- 23.5^o ביחס למישור.



איור 5: תנועת כדור הארץ סביב השמש לפי המודל הליוצנטרי



חשוב להדגיש כי העונות לפי מודל זה נוצרות בשל זווית הנטייה של ציר סיבוב כדור הארץ ביחס למישור ההקפה של כדור הארץ סביב השמש. גודל הזווית 23.5^o .



7. המרחק מהשמש כגורם לשינוי העונות

הדעה הרווחת היא שתופעת עונות השנה קשורה בהשתנות מרחק כדור הארץ מהשמש. מספר מחקרים שנעשו בנושא מצביעים על כך שמרבית האנשים סבורים שכדור הארץ קרוב יותר אל השמש בקיץ ורחוק ממנה בחורף.

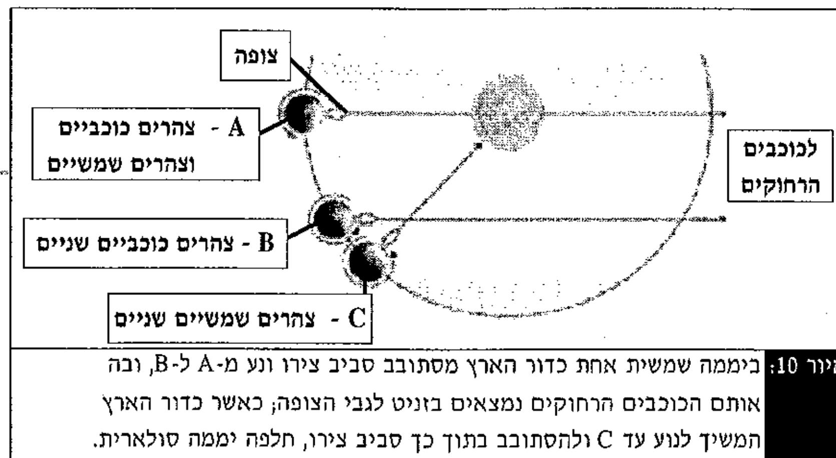
נתונים על מרחק כדור הארץ מהשמש מופיעים בטבלה 1. מהנתונים ניתן ללמוד שהפלנטה שלנו קרובה ביותר לשמש דווקא בינואר (עבור שני חצאי הכדור) ורחוקה ביותר ביולי. הנטייה של חצי כדור כלפי השמש או הלאה ממנה משנה את המרחק מהשמש רק בכאלף ושש מאות ק״מ בהשוואה לחצי הכדור השני. השינוי במרחק בין החצאים של כדור הארץ זניח בהשוואה לשינויים במרחק המסלולי של כדור הארץ מהשמש, שינויים המגיעים לכדי 6 מיליון ק״מ, הפרש בין מרחק ארץ-שמש ביולי לבין מרחק זה בינואר. לו היה המרחק מהשמש הגורם החשוב, היה בשני חצאי הכדור קיץ בינואר וחורף ביולי!

חודש	מרחק ממוצע שמש - כדה״א
ינואר	147,000,000 ק״מ
מארס	149,000,000 ק״מ
יוני	153,000,000 ק״מ
יולי	153,000,000 ק״מ
ספטמבר	150,000,000 ק״מ
דצמבר	148,000,000 ק״מ

טבלה 1: מרחק כדור הארץ מהשמש

8. מה בין יממה שמשית לימה כוכבית?

מבחינים בין שני סוגי יממה: יממה שמשית (solar day) ויממה כוכבית (sidereal day). כשחולפת יממה שמשית, הפלנטה משלימה סיבוב סביב צירה ביחס לשמש, וכשחולפת יממה כוכבית הפלנטה משלימה סיבוב סביב צירה ביחס לכוכבים הרחוקים (ראה איור 10).



איור 10: ביממה שמשית אחת כדור הארץ מסתובב סביב צירו ונע מ-A ל-B, ובה אותם הכוכבים הרחוקים נמצאים בזנית לגבי הצופה; כאשר כדור הארץ המשיך לנוע עד C ולהסתובב בתוך כך סביב צירו, חלפה יממה סולארית.

9. מהו אורך היממה בפלנטות אחרות?

אורך היממה שונה בכל פלנטה (ראה טבלה 2). ניתן להבחין שבכל הפלנטות, פרט לנוגה היממה הכוכבית קצת יותר קצרה, ושההפרש הולך וקטן ככל שהפלנטה רחוקה יותר מהשמש. ההסבר לעובדה שהיממה הכוכבית של נוגה דווקא ארוכה יותר מהיממה הסולארית, נעוץ בכך שנוגה סובבת סביב צירה במגמה הפוכה לזו של סיבוב שאר הפלנטות סביב צירן.

הפלנטה	אורך יממה סידריאלית	אורך יממה סולארית
כוכב חמה	58.65 ימים	176 ימים
נוגה	243.01 ימים	117 ימים
ארץ	23.93 שעות	24 שעות
מאדים	24.62 שעות	24.63 שעות
צדק	9.84 שעות	9.84 שעות
שבתאי	10.23 שעות	10.23 שעות
אוראנוס	17.9 שעות	17.9 שעות
פטון	19.2 שעות	19.2 שעות
פלוטו	6.39 ימים	6.39 ימים

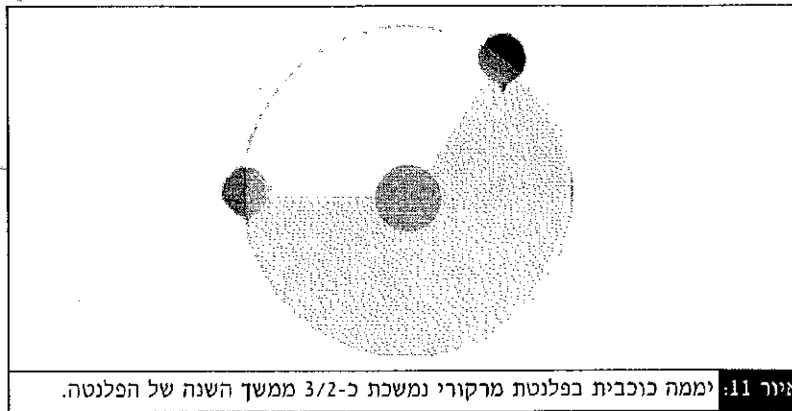
טבלה 2: יממות פלנטריות

10. מהו אורך השנה בפלנטת מרקורי?

שנה של פלנטת מרקורי היא פרק הזמן, שבו הפלנטה משלימה הקפה אחת סביב השמש.
שנה במרקורי נמשכת כ-88 יממות של כדה"א. סיבוב אחד של מרקורי סביב צירה נמשך 3/2 משנת מרקורי, או כ-59 יממות. זוהי היממה הכוכבית של מרקורי (ראה איור 11).
היממה השמשית של מרקורי נמשכת כשנתיים (176 ימים, או שני סיבובים שלמים של מרקורי סביב השמש), כלומר בין זריחה אחת לזריחה הבאה, בנקודה מסוימת על פני מרקורי, חולפות שנתיים.

ההסבר לעובדה שהתנועה של מרקיורי סביב צירו איטית, דומה להסבר לכך שזמן ההקפה של הירח סביב כדור הארץ שווה לזמן הסיבוב שלו סביב צירו; בהסבר זה נעסוק בפרק על הירח.

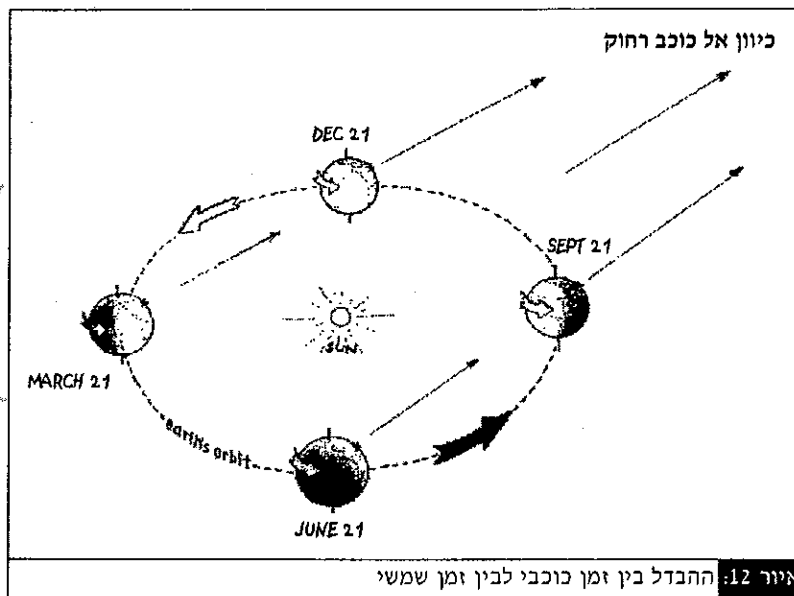




איור 11: יממה כוכבית בפלנטת מרקורי נמשכת כ-3/2 ממשך השנה של הפלנטה.

11. זמנים בפיזיקה ואסטרונומיה

מרבית השיטות למדידת זמן מבוססות על סיבוב השמים במהלך היממה המשקף את סיבוב כדור הארץ סביב צירו. זמן הסיבוב של כדור הארץ סביב צירו שונה במערכות קואורדינטות שונות: זמן סיבוב שלם של כדור הארץ הנמדד ביחס לכוכבים קצר יותר בהשוואה לזמן סיבוב הנמדד ביחס לשמש. הפרש הזמנים בין שתי המדידות נוצר עקב סיבוב כדור הארץ סביב השמש (ראה איור 12). זו הסיבה להבחנה בין **זמן הכוכבי** לבין **זמן השמשי**. מעשית, **מדידת זמן (איזה זמן?)** מתבצעת על-ידי מדידת זוויות בין כיוון אל נקודה כלשהי בשמים לבין מישור של קו הצהריים. משום שלכל כוכב יש תנועה עצמית בכיוון אקראי, כוכבים אינם יכולים לשמש למדידת זוויות. במקום זה אסטרונומים עוקבים אחרי תנועה של נקודה דמיונית בשמים הנקודה שבה השמש נמצאת באביב, כאשר היום והלילה משתווים באורכם (שוויון אביבי - vernal equinox).



איור 12: ההבדל בין זמן כוכבי לבין זמן שמשי



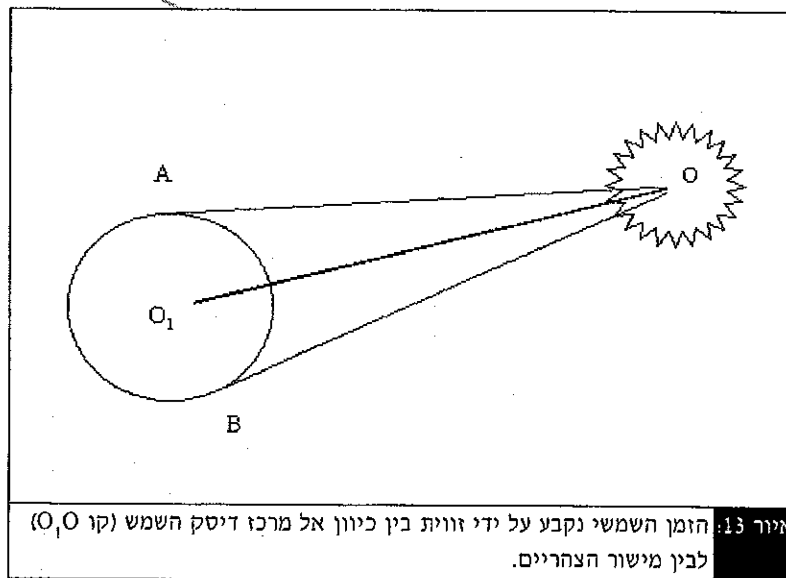
לצורך הגדרת המושג יממה כוכבית נגדיר תחילה מהו מעבר עליון.
מעבר עליון של כוכב מסוים הוא הרגע שבו כוכב חותך את מישור קו הצהריים בצד הדרומי שלו.
יממה כוכבית היא רווח זמן בין שני מעברים עליונים עוקבים של נקודת שוויון אביבי באותו מקום על פני כדור הארץ.

היממה הכוכבית מורכבת, כרגיל, מ-24 שעות או 1,440 דקות או 86,400 שניות. הזמן שעבר ממעבר עליון אחרון נקרא הזמן הכוכבי.

בניגוד לזמן כוכבי, מדידות הזמן השמשי מבוססות על תנועת השמש במהלך יממה.

יממה שמשית היא רווח זמן בין שני מעברים תחתונים עוקבים של מרכז דיסק השמש באותו מקום על פני כדור הארץ.

מעבר תחתון של גרם שמים מסוים הוא הרגע, שבו גרם השמים חותך את מישור קו הצהריים בצד הצפוני שלו. במקומות שונים על פני כדור הארץ הכיוון אל מרכז דיסק השמש שונה. לכן משתמשים בקו המחבר בין מרכז דיסק השמש לבין מרכז כדור הארץ בתור הכיוון הזה (ראה איור 13). מעבר תחתון של השמש (חצות) מסמן תחילת יממה שמשית אמיתית.



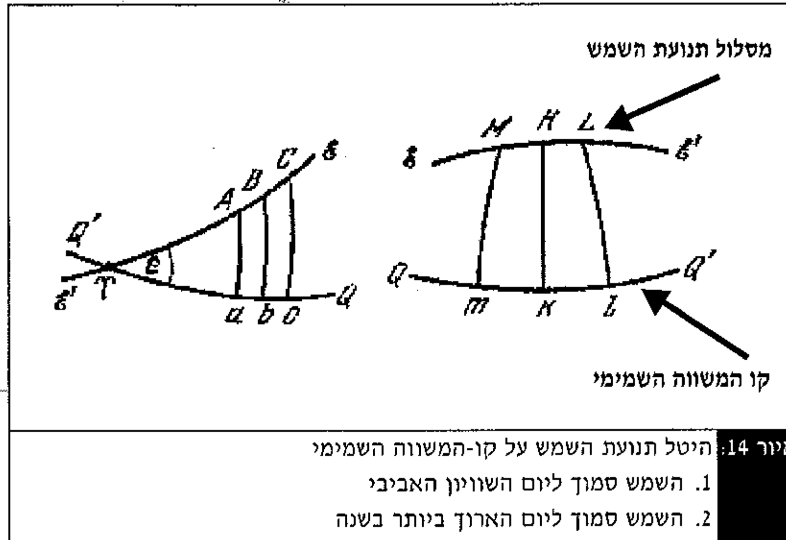
איור 13: הזמן השמשי נקבע על ידי זווית בין כיוון אל מרכז דיסק השמש (קו O_1O) לבין מישור הצהריים.



הזמן השמשי האמיתי אינו מתאים לשימוש יומיומי. שתי סיבות לכך:

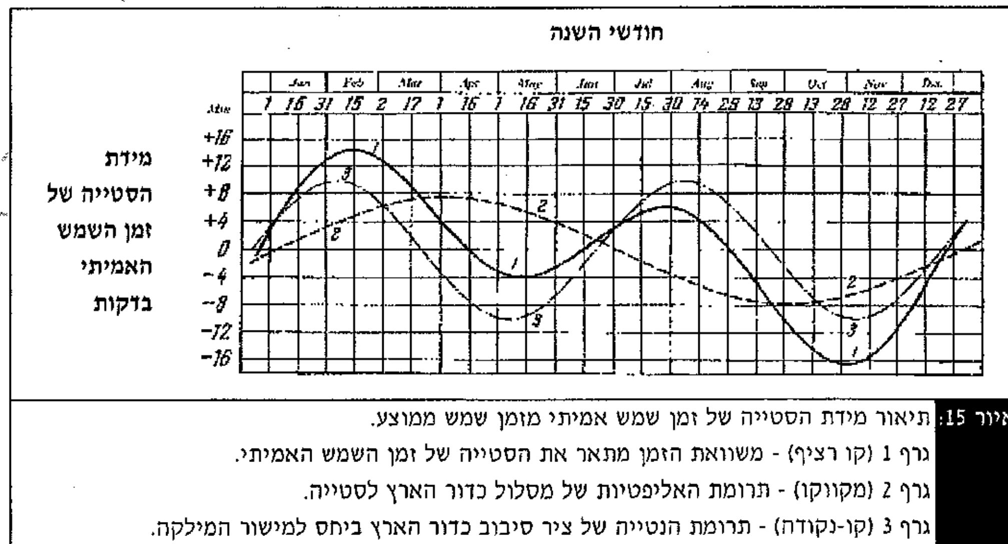
1. תנועה לא קצובה של השמש בשמים במהלך שנה, כי מסלול כדור הארץ אינו מעגלי.
2. שיפוע של מסלול השמש ביחס לקו-המשווה השמימי.

בגלל הזווית בין מסלול תנועת השמש לבין מישור של קו-המשווה השמימי קטעים שווים בתנועת השמש בהטלה על קו-המשווה הופכים לקשתות לא שוות (ראה איור 14). לכן הזמן השמשי הנמדד כזווית הסיבוב של מרכז דיסק השמש לא יהיה קצוב.



איור 14: היטל תנועת השמש על קו-המשווה השמימי
1. השמש סמוך ליום השוויון האביבי
2. השמש סמוך ליום הארוך ביותר בשנה

למעשה, משתמשים ב"זמן שמשי ממוצע" הזמן שנקבע על ידי "השמש הממוצעת" הדמיונית שזזה על קו-המשווה השמימי במהירות קבועה. ההפרש בין הזמן השמשי האמיתי לבין הזמן השמשי הממוצע משתנה במהלך שנה ומכונה "משוואת זמן". ארבע פעמים במהלך שנה הזמנים הללו משתווים (ראה איור 15) ב-15 באפריל, 14 ביוני, 1 בספטמבר ו-24 בדצמבר, אך לעתים ההבדל ביניהם מגיע עד ל-18 דקות.



איור 15: תיאור מידת הסטייה של זמן שמש אמיתי מזמן שמש ממוצע.
גרף 1 (קו רציף) - משוואת הזמן מתאר את הסטייה של זמן השמש האמיתי.
גרף 2 (מקווקו) - תרומת האליפטיות של מסלול כדור הארץ לסטייה.
גרף 3 (קו-נקודה) - תרומת הנטייה של ציר סיבוב כדור הארץ ביחס למישור המילקה.

כידוע, כדור הארץ מסתובב סביב צירו, ובו-זמנית סובב סביב השמש. משום ששני הסיבובים הללו מתבצעים באותו כיוון (נגד כיוון השעון במבט מלמעלה), נוצר הבדל בין מספר הסיבובים שכדור הארץ סובב סביב צירו ביחס לכוכבים (366 סיבובים במהלך שנה) לבין מספר הסיבובים שכדור הארץ סובב סביב צירו ביחס לשמש (365 סיבובים). ההבדל הוא תוצאה של סיבוב נוסף של כדור הארץ סביב השמש. אילו היה צד אחד של כדור הארץ תמיד מופנה לשמש (כלומר, אילו כדור הארץ לא היה מסתובב סביב צירו ביחס לשמש), גם אז הוא היה עושה סיבוב אחד סביב צירו ביחס לכוכבים.

סיבוב אחד (24 שעות) במהלך שנה (365.24220 יממות השמש) יוצר הבדל בין יממת השמש לבין יממת הכוכבים שהוא:

$$\frac{24^{h}}{365.24220} = 3_{m}\ 56.555_{S}$$

במילים אחרות: יממת הכוכבים קצרה מיממת השמש ב-3 דקות ו-56.666 שניות. בגלל האי-התאמה הזאת כל ערב כוכב מסוים יזרח ב-3 דקות ו-56.555 שניות מוקדם יותר מאשר יום קודם. **זאת הסיבה לכך** שבחיי היומיום איננו משתמשים בשעון כוכבי, אך בתצפית אסטרונומית משתמשים דווקא בשעון זה.

$$M = \frac{366.2422}{365.2422}\ S^* = 1.002738\ S^*$$

אם נסמן פרק-זמן על-פי שעון השמש כ-M, ואותו פרק-הזמן על-פי השעון הכוכבי כ- *S , אז נקבל:

$$S^* = \frac{365.2422}{366.2422}\ M = 0.997270\ M$$

זמנים במקומות שונים על פני כדור הארץ שונים זה מזה. זמן כוכבי *S וזמן שמשי ממוצע M בקו-אורך מסוים נקראים הזמן הכוכבי המקומי והזמן השמשי המקומי. **לדוגמה**, בכל המקומות הנמצאים על אותו קו-האורך יהיו הזמנים המקומיים שווים. הזמן המקומי השמשי על קו-האורך של Greenwich נקרא universal time (UT).

לו נהגנו על-פי הזמן השמשי, כאשר היינו מטיילים על פני כדור הארץ, היינו צריכים לעדכן את השעונים באופן קבוע בהתאם לשינויים בזמן מקומי. על מנת למנוע בעיה זו הוחלט בסוף המאה ה-19 לחלק את פני כדור הארץ ל-24 אזורי זמן.
רוחבו של אזור זמן הוא שעה אחת או (360°/24=15°). בכל אזור זמן קיים זמן אחיד, שנקבע על-פי הזמן המקומי של קו-האורך המרכזי, והזמן הזה נקרא **הזמן האזורי**.



כמו שראינו, הזמן שנקבע על-פי תצפיות אסטרונומיות אינו זמן קצוב. הסיבה העיקרית לכך - סיבוב לא קצוב של כדור הארץ סביב צירו וסביב השמש. לצורך ביצוע ניסוים מדויקים פיזיקאים זקוקים לזמן קצוב, שאינו משתנה. בשנת 1950 בכנס בינלאומי בפריס הסכימו מדענים על זמן קצוב, שנקרא "זמן ניוטוני" או ephemeris time. הזמן הזה משתתף כמשתנה במשוואות המתארות את תנועת הגופים במערכת השמש ונקבע כיום באמצעות "שעון אטומי". לפני 1950 נקבעה באסטרונומיה ובמדע היחידה הבסיסית של מדידת הזמן (השנייה) כ-1/86400 של יום השמש הממוצע. כיום מגדירים "שניה אטומית" כיחידת זמן שהיא המשך של 9,192,631,770 תנודות אלקטרומגנטיות של אור הנפלט על-ידי אטום Cs^{133}, כשהוא עובר בין שתי רמות מסוימות של אנרגיה. זמן אטומי הרבה יותר מדויק מן הזמן הנקבע על-פי תצפית אסטרונומית.

כיום באסטרונומיה מקובלת מערכת סימני הזמן כדלקמן:

א. **UTO** - הזמן השמשי הממוצע על קו האורך של Greenwich.

ב. במקומות שונים על כדור הארץ הזמן **UTO** יהיה שונה בגלל שינויים של קווי-אורך עקב תנועת הקטבים של כדור הארץ. הזמן המתוקן הוא על כן:

$$UT1 = UTO + \Delta\lambda$$

ג. **UT1** - הוא זמן לא קצוב, בשל תנועת כדור הארץ. על מנת להגיע לקצב זמן שמשתנה פחות, מוסיפים ל-**UT1** תיקון קטן ומשתנה ΔT_s:

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s$$

ד. הזמן **UT2** עדיין אינו קצוב לגמרי. כדי לעבור ל"זמן ניוטוני" או ET ephemeris time (הזמן שנכנס למשוואות תנועה של גופים במערכת השמש), יש להוסיף ל-**UT2** תוספת קטנה:

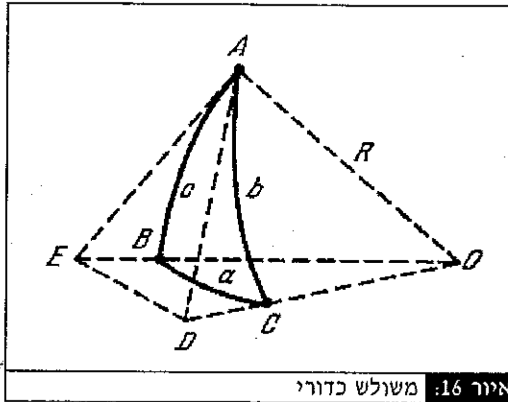
$$ET = UT2 + \Delta t$$

כל התוספות למעבר בין הזמנים - Δt, ΔT_s, $\Delta\lambda$ כל שנה מפרסמים בספרות מקצועית אסטרונומית (Astronomical Annual).

ה. אותות הזמן האטומי (UTC) משדרים היום ברדיו. כדי שלא תיווצר אי-התאמה בין הזמן האטומי לזמן האסטרונומי, כל פעם כאשר הפרש [UTC-UT1] מגיע ל-0.7 שניות, משנים את ה-**UTC** שהוא יהיה שווה ל-**UT1**. השינוי הזה מתבצע בדרך-כלל באחד בינואר ובאחד ביולי. כתוצאה מכך סקלת הזמן **UTC** גם מתאימה לצרכים אסטרונומיים וגם נשארת קצובה במידה מרבית.



12. חישוב מקומם של גרמי שמים



איור 16: משולש כדורי

מטרת פרק זה היא להציג בדרך שיטתית את החישוב של זמני השקיעה והזריחה של גרמי השמים וכן את מיקומם בשמים בשעות היום והלילה. חישוב מיקומם של גורמי השמים נעשה באסטרונומיה באמצעות משולשים דמיוניים על כיפת השמים. אלו אינם משולשים שטוחים המוכרים לנו מלימודי ההנדסה, אלא משולשים מעגליים.

הצלעות במשולשים אלה הן קשתות AB, AC ו-BC, כאשר כל קשת כזאת היא חלק של מעגל שמרכזו מתלכד עם מרכז כדור הארץ (ראה איור 16).

משולש כזה מכונה **"משולש כדורי"**. משום שלרדיוס של כיפת השמים אין ערך מסוים, נהוג למדוד אורך של כל צלע במשולש כדורי ביחידות של זווית בכוונה, שלכל צלע מתאימה זווית מרכזית מסוימת. לדוגמה, לצלע b מתאימה זווית AOC. זוויות של משולש כדורי A, B ו-C הן זוויות בין שני מישורים, לדוגמה זווית B היא זווית בין מישור ABO לבין מישור OBC. סכום הזוויות של משולשים כדוריים תמיד גדול מ-180^o וקטן מ-540^o.

עתה נביט במשולש הכדורי ABC המשורטט על כיפת השמים, כאשר - O מציין את מרכז כדור הארץ. דרך נקודה A נעביר שני קווים AE ו- AD, המשיקים לכיפת השמים בנקודה A.

עבור כל אחד משני המשולשים הרגילים ADE ו- ODE ניתן לרשום את משפט הקוסינוסים:

$$DE^2 = OD^2 + OE^2 - 2 \times OD \times OE \times \cos\alpha \qquad (1)$$

$$DE^2 = AD^2 + AE^2 - 2 \times AD \times AE \times \cos A \qquad (2)$$

חיסור (2) מתוך (1) נותן:

$$2 \bullet OD \bullet OE \bullet \cos\alpha = OD^2 - AD^2 + OE^2 - AE^2 + 2 \times AD \times AE \times \cos A \qquad (3)$$

מהעובדה שמשולשים OAE ו- OAD הם ישרי-זווית נובע:

$$OD^2 - AD^2 = R^2 \qquad OE^2 - AE^2 = R^2 \qquad (4)$$

$$AD = R \tan b; \qquad AE = R \tan c;$$

$$OE = \frac{R}{\cos b} \qquad OE = \frac{R}{\cos c}$$

נציב את (4) אל (3) ונקבל:

$$\cos\alpha = \sin b \times \cos c + \sin b \times \sin c \times \cos A \quad (5)$$

נוסחה (5) היא הנוסחה הבסיסית בעולם של משולשים כדוריים. כמובן, ניתן לקבל עוד נוסחאות, אך נסתפק בכך.

בזמן זריחה או שקיעה של כוכב הגובה שלו $h = 0^o$ או $Z = 90^o$, לכן באמצעות (8) מקבלים:

$$\cos t = \frac{\cos (90^o) - \sin \varphi \ \sin \delta}{\cos \varphi \ \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta \qquad (10)$$

מתוך המשוואה (10) מתקבלות שתי תשובות: חיובית $t = t_1$ ושלילית $t = -t_2$.
הערך החיובי של t מייצג את שקיעת הכוכב, ואילו הערך השלילי מייצג את זריחתו.
הזמן הכוכבי של זריחה ושל שקיעה שווה אז בהתאמה:

$$s = \alpha - t$$
$$s = +t$$

על מנת לחשב את האזימוט של נקודות הזריחה והשקיעה, נציב אל (9) $Z = 90^o$. נקבל:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi} \qquad (11)$$

על-פי (11) נקבל שני ערכים של אזימוט: $A_1 = A$ ו-$A_2 = 360^o - A$. הערך הראשון מייצג את אזימוט השקיעה, ואילו הערך השני מייצג את אזימוט הכוכב בנקודת הזריחה.

לסיום, נרשום את (10) ו- (11) בצורה אחרת:

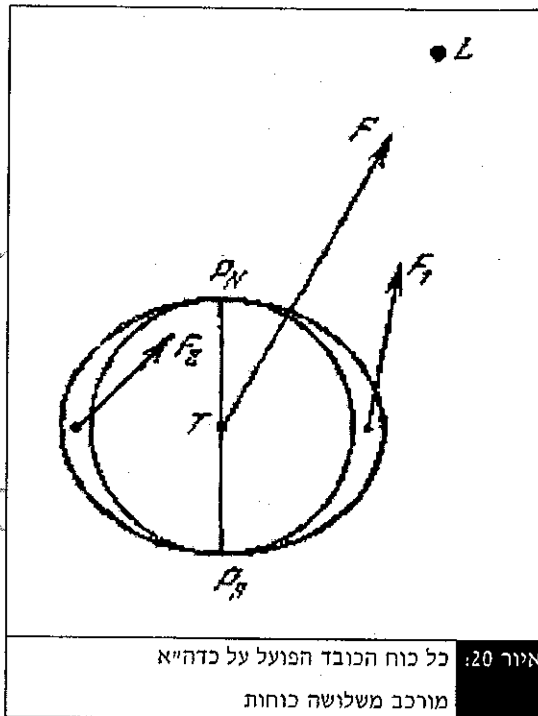
$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin (90^o - \varphi)} \qquad \cos t = -\frac{\tan \delta}{\tan (90^o - \varphi)}$$

כיוון שלא ייתכן ש-$\cos x < -1$, משתי הנוסחאות נובע כי שקיעה וזריחה של גרם השמים מתקיימות רק בתנאי ש-

$$|\delta| < (90^o - |\varphi|)$$

15. תנועת נקיפה (precession) ותנועת נענוע (notation) של כדור הארץ

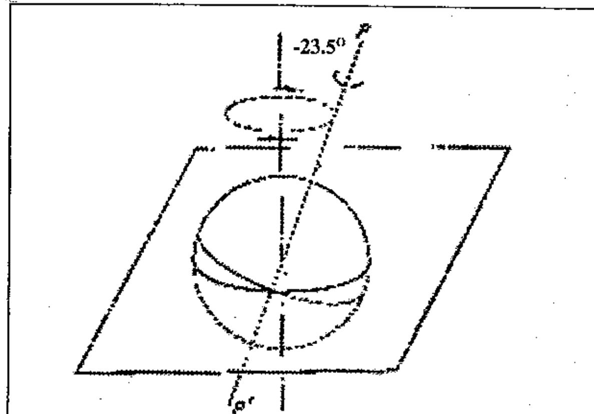
אילו היה כדור הארץ (כדה״א) אחיד ומוצק, אזי המהירות והכיוון של הסיבוב סביב צירו היו נשארים קבועים לאורך הזמן. אך בניגוד לשמו, כדה״א אינו כדור. צורתו דומה יותר לאליפסואיד (ראה איור 20). כוח הכובד $\mathbf{F_O}$ שמפעיל על כדה״א גוף כלשהו $\mathbf{L}$, יהיה מורכב משלושה כוחות: $\mathbf{F}$ - כוח הפועל על הכדור החסום, $\mathbf{F_1}$ - כוח הפועל על ״התוספת״ הקרובה ו-$\mathbf{F_2}$ - כוח הפועל על ״תוספת רחוקה״. כיוון שהכוח $\mathbf{F_1}$ גדול מהכוח $\mathbf{F_{20}}$, כוח הכובד $\mathbf{F_O}$ מנסה בסך-הכול לסובב את כדה״א נגד השעון, כך שקו-המשווה יהיה מקביל לכיוון פעולת הכוח $\mathbf{F_O}$. במקרה כזה כדה״א מתנהג כמו סביבון, כלומר ציר הסיבוב שלו יסטה בכיוון המאונך ל- ״מישור הכוחות״ $\mathbf{F_1}$ ו-$\mathbf{F_2}$.



איור 20: כל כוח הכובד הפועל על כדה״א מורכב משלושה כוחות

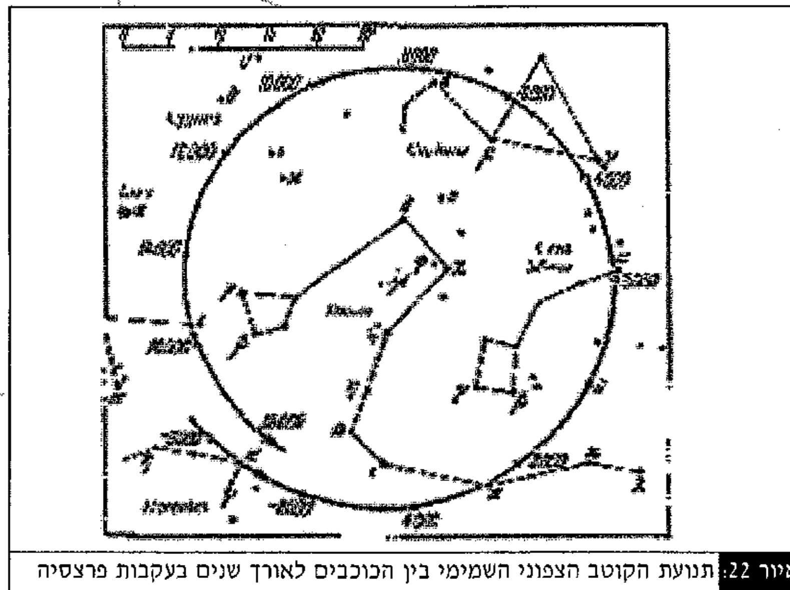
הגופים שהשפעתם על כדהא משמעותית במיוחד הם השמש והירח. בהשפעתם ציר הסיבוב של כדהא מבצע תנועה מורכבת מאוד בחלל.

קודם כל, ציר הסיבוב של כדה״א **PP** (ראה איור 21) זז סביב אנך למישור סיבוב כדה״א סביב השמש, כך שהזווית ביניהם נשארת כמעט קבועה $23°27'$. תנועה זאת נקראת **תנועת נקיפה**, זמן המחזור שלה כ-26,000 שנים. בהשפעת תנועת הנקיפה הקוטב הצפוני השמימי (וגם הקוטב הדרומי) זז בין כוכבים במשך זמן (ראה איור 18). מסלול הקוטב אינו סגור, משום שבנוסף לירח ולשמש משפיעות על כדה״א גם פלנטות של מערכת השמש, אשר גורמות לסטיית מישור האקליפטיקה. כידוע, ציר הסיבוב של כדה״א והן מישור של קו-המשווה השמימי (המאונך לציר הסיבוב) קובעים את הקואורדינטות השמימיות של כוכבים. לכן בעקבות הפרצסיה קואורדינטות שמימיות של כוכבים משתנות בהתמדה.



איור 21: תנועת ציר הסיבוב של כדור־הארץ בעקבות פרצסיה

כמו שניתן לראות באיור 22, כעת הקוטב הצפוני השמימי נמצא סמוך לכוכב α Ursae Minoris, הידוע יותר בשמו "כוכב הצפון". שמו נובע מהעובדה הפיזקלית הפשוטה, שציר סיבוב כדה"א מופנה, בקירוב רב אליו. אך לפני כ-4,000 שנים שימש Draconis כ"כוכב הצפון", כי הוא היה הקרוב ביותר לקוטב השמימי.
לפני כ- 3,500-3,000 שנים היה הקוטב קרוב לכוכב Ursae Minoris . לכוכב זה יש שם מעניין: Kohav, כלומר "כוכב", בדיוק כפי שהוא נשמע בשפה העברית.
נציין שבעוד כ-12,000 שנים יהיה הכוכב שיתפקד כ"כוכב הצפון" כוכב בהיר ביותר בשמי הצפון: Lyrae - Vega.



איור 22: תנועת הקוטב הצפוני השמימי בין הכוכבים לאורך שנים בעקבות פרצסיה

בגלל הנקיפה המצב היחסי בין מישור של קו-המשווה השמימי לבין מישור האקליפטיקה (סיבוב כדה"א סביב השמש) משתנה, ונקודות החיתוך שלהם זזות באיטיות מערבה "50.26 לשנה. לנקודות אלה נודעת חשיבות רבה. כאשר השמש נמצאת באחת מהן, קיים שוויון בין משך היום למשך הלילה. כיוון שהנקודות זזות מערבה, נגד תנועה שנתית של השמש לאורך האקליפטיקה, כל פעם השמש מגיעה אל נקודות אלה מוקדם יותר. לכן רווח הזמן בין שני מעברים עוקבים של השמש דרך נקודה כזאת (שנה טרופית) יהיה קצר יותר מאשר זמן סיבוב של כדהא סביב השמש (שנה כוכבית). ההפרש שווה בערך ל- 20 דקות - זה הזמן הדרוש לשמש למעבר זווית בת "50.26 (השמש עוברת כל יממה כמעלה אחת מזרחה לאורך האקליפטיקה).

תנועת הנקיפה גורמת לשינוי איטי במראה שמי הלילה. בעוד אלפי שנים יוכלו הדורות הבאים לראות בשמים הצפוניים את קבוצת הכוכבים Crux, בעוד ש-Sirius ו-Orion יעברו לשמים דרומיים.

בנוסף לתנועת הנקיפה של ציר כדה"א, כדה"א נע בתנועות קטנות יותר סביב צירו הנוכחי. תנועות אלה מתקיימות בהשפעת כוחות F_1 ו-F_2, המופעלים על-ידי השמש והירח. כיוון הכוחות וגודלם משתנים בעקביות.

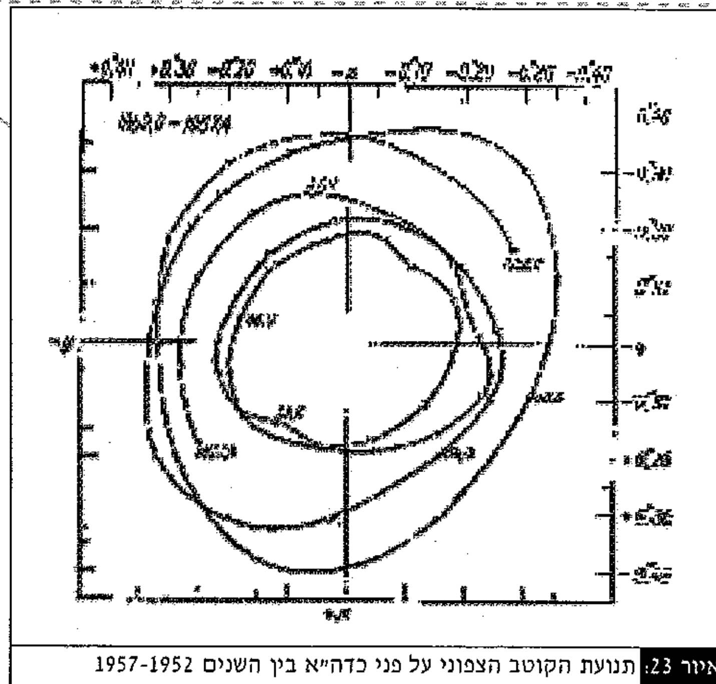
הכוחות הולכים וגדלים, ככל שהשמש והירח נמצאים רחוק יותר ממישור המשווה של כדה"א. סוג זה של תנועת הציר

כדה"א נקרא **תנועת נענוע** (notation). זמן מחזור של תנועת הנענוע העיקרית שווה ל-18.6 שנים. כתוצאה מתנועה זו זז הקוטב השמימי של כדה"א בין קבוצות כוכבים בצורה אליפטית. גודל צירי האליפסה הוא "18.42 ו-"13.72.

16. תנועת הקטבים של כדה"א

מתוך תצפית התברר שקווי-הרוחב והאורך של נקודה כלשהי על פני כדה"א אינם נשארים קבועים, אלא משתנים. תופעה זאת משקפת את תנועת כדהא סביב ציר הסיבוב שלו. ברגעים שונים ציר הסיבוב של כדה"א עובר דרך נקודות שונות. כך נוצר "קוטב זז" (ראה איור 23). תנועת הקוטב מתרחשת נגד כיוון השעון ובתוך ריבוע בעל צלע כ-30 מאיות שנית קשת. התנועה היא תנועה מחזורית מסובכת, וניתן לבודד שני מחזורים עיקריים: מחזור שנתי (12 חודשים) ומחזור Chandler (14 חודשים). המחזור השנתי קשור לתנועות אוויר ומים עונתיות, המשנות התפלגות מסות בכדה"א ומזיזות אותו ביחס לצירו.

מחזור Chandler הוא מחזור של תנודות טבעיות של כדה"א . על-פי חישובים מחזור Chandler אמור להיות שווה ל-10 חודשים, אילו היה כדה"א גוף קשיח. אך במציאות כדה"א הוא גוף אלסטי ועשוי להתעוות. עיוות זה מגדיל את זמן המחזור עד ל-14 חודשים.



איור 23: תנועת הקוטב הצפוני על פני כדה"א בין השנים 1957-1952





פרק ב': הספק השמש וקוטרה



פעילות 3: מדידת הספק השמש - דידקטיקה

מבוא

בשתי הפעילויות הראשונות שביצענו ערכנו היכרות עם השפעת תנועת השמש עלינו כתושבי כדה"א. בשתי פעילויות שבהן נעסוק בפרק זה נערוך היכרות עם תכונות השמש, כלומר נעבור מתיאור איכותי של תנועה ומקום למדידה כמותית של כמות קרינה ושל קוטר השמש. המפגש עם השמש הוא קפיצת מדרגה עבור התלמידים, כמות הקרינה הנפלטת ממנה בהשוואה למה שמוכר על פני כדור הארץ, היא גדול לאין שיעור. הדבר נכון גם באשר לממדיה, שאינם נתפסים על ידי מי שרגיל בממדים יומיומיים קילומטרים אחדים.

הפעילות הראשונה - מדידת הספק השמש, מורכבת מארבעה חלקים:

1. מה דעתך? בירור עמדות פתיחה של התלמידים - 20 דקות.
2. בניית פוטומטר פשוט שיטה להערכת עוצמת קרינה - 30 דקות.
3. חקירת הקשר בין עוצמת ההארה למרחק ממקור אור נקודתי - 30 דקות.
4. מדידת הספק השמש - 30 דקות.

רצוי לעבור על הפעילויות לפי סדרן. ייתכן שכבר הספקתם ללמד את נושא הקשר בין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי בשיטה שונה מזו המוצעת כאן. במקרה זה יהיה עליכם לשקול אם ברצונכם להציג שיטה נוספת או לוותר על מרכיב זה בפעילות בשל אילוצי זמן. מעבר על כל חלקי הפעילות כולל מבוא וסיכום נאות דורש כשלושה שיעורים באורך של 45 דקות, אלא אם כן ניתן לוותר על חלק ב בפעילות.

מה דעתך?

כיצד ניתן להעריך כמה אנרגיה פולטת השמש? הניסיון היומיומי של התלמידים לגבי כמות אנרגיה הנפלטת ממקורות אור קשור לנורות חשמליות או למדורות. מושג האנרגיה אצל מרבית התלמידים מעורפל למדיי, אך הם שמעו אותו פעמים רבות ויודעים שיש לשלם על צריכת אנרגיה. יחידה זו מנסה לברר את הקושי במעבר בין הידע היומיומי לבין הידע הפיזיקלי לגבי כמות האנרגיה של השמש.

בשלב ראשון יש לבקש מהתלמידים לענות באופן אישי להתייעץ עם חבריהם. משך זמן זה כעשר דקות. לאחר מכן ניתן להקדיש כחמש דקות לדיון קבוצתי, שבו יציגו התלמידים את עמדותיהם, וחמש דקות לדיון במליאה. במקרה של לחץ בזמן ניתן להסתפק באיסוף התשובות לשתי השאלות הראשונות בלבד. בשלב זה ישקף המורה את עמדות התלמידים השונות בלי לציין את עמדתו.



שאלה 1

במקרים רבים תלמידים נוטים להעריך שכמות האנרגיה הנצרכת על ידי תושבי כדה"א גדולה מזו הנפלטת על ידי השמש.

הערכה גסה של כמות האנרגיה הנצרכת על ידי תושבי כדה"א במשך שנה תתבסס על כמות צריכת החשמל על-ידיהם. החשבון המובא כאן הוא לצורך הידע של המורה, ואין לחלוק אותו בשלב זה עם התלמידים. ניתן להשתמש בו רק לאחר סיום הפעילות, כאשר נחזור ונשווה את עמדות הפתיחה עם המדידות שביצענו.

נעריך את ההספק הנצרך ע"י תושבי העולם בהשוואה להספק הנצרך על ידי תושבי ישראל. זהו אינו חשבון מדויק, אך הוא נותן סדר-גודל, ודי לנו בכך. ההספק החשמלי שצורכים תושבי ישראל הוא 10^{10} וט בערך. מספר תושבי העולם הוא פי אלף לערך ממספר תושבי ישראל, לכן נעריך את ההספק החשמלי של האנושות ב-10^{13} וט בערך. מספר השניות בשנה הוא כ-31 מיליון. לכן ניתן להעריך את האנרגיה החשמלית הנצרכת על ידי כל תושבי כדה"א במשך שנה בסדר-גודל משוער של 10^{20} ג'יאול בשנה. הספק השמש הוא 10^{26} וט בערך. כלומר כמות האנרגיה הנפלטת מהשמש בשנייה אחת תוכל להספיק למשך מיליון שנה לצריכת אנרגיה חשמלית של תושבי כדה"א. אם נרצה להעריך את כלל האנרגיה הנצרכת על ידי תושבי הארץ נצטרך להגדיל כמות זו בסדר-גודל אחד לערך. כלומר במקרה זה אנרגיית השמש הנפלטת בשנייה אחת, תספיק "רק" למאה אלף שנה.

שאלה 2

במקרים רבים תלמידים מעריכים שקיים הבדל משמעותי, והצריכה השנתית של אנרגיה על ידי תושבי כדה"א גדולה בהרבה מזו הנפלטת מהשמש בשניה אחת. מחישוב שנעשה בתשובה לשאלה הקודמת ברור שהערכה זו אינה נכונה, למרות שהיא רווחת למדיי.

שאלה 3

במחקר קודם שערכנו התברר כי למעלה מתשעים אחוז מתלמידי התיכון סבורים שמקור האור של כוכבים הוא השמש. זוהי שגיאה נפוצה למדיי. קשה לשכנע תלמידים שאין זה כך, כאשר סקלת המרחקים שלהם היא סקלה ארצית.

שאלה 4

השמש היא כוכב בינוני, כלומר כמחצית מהכוכבים שאנו רואים מאירים בעוצמה גדולה מזו של השמש. כדי לדעת זאת יש למדוד את המרחק אל כוכבים אלה ולהשוות אותו עם עוצמת ההארה של הכוכבים. מדידה זו דומה עקרונית לדרך המדידה של הספק השמש. מכאן שבפעילות זו שבה אנו מודדים את הספק השמש, נכיר שיטה שתאפשר למדוד גם את ההספקים של כוכבים אחרים. אלא שאז יש להשתמש בפוטומטרים בעלי רגישות גבוהה מאוד, שכן עוצמת ההארה המגיעה מהכוכבים נמוכה בסדרי-גודל רבים מעוצמת ההארה של השמש.



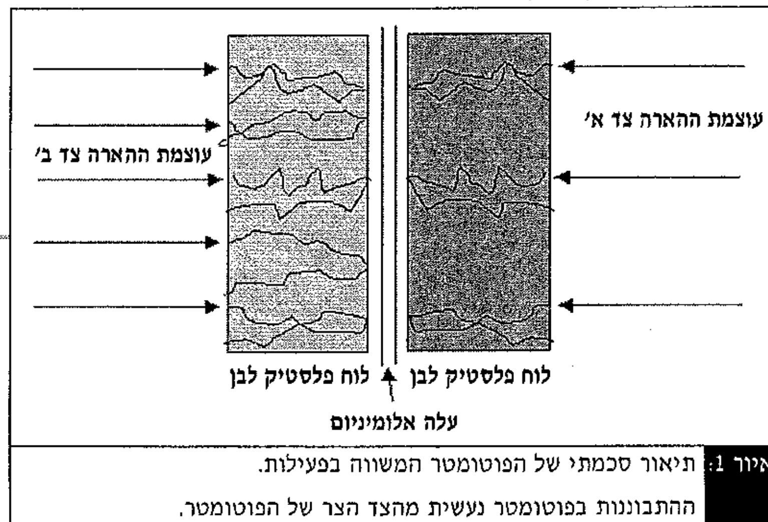
התשובות המופיעות כאן הן לצורכי המורה, אך אין להציג אותן בשלב זה בפני הכיתה, אלא לרכז את עמדות התלמידים. התייחסות מסודרת לעמדות התלמידים תיעשה רק לאחר שתתבצע הפעילות. כלומר בידי התלמידים תהיה הערכה מסודרת של הספק השמש, והם יוכלו להתרשם מקצב ייצור האנרגיה בשמש לעומת קצב צריכת האנרגיה ע"י המין האנושי.

חלק א: בניית פוטומטר פשוט

עוצמת ההארה היא מושג מורכב המתאר את היחס בין כמות אנרגיה שמגיעה ביחידת זמן ובין שטח. תיאור פיזיקלי מדויק של הנושא עלול להימשך זמן רב יחסית. בחלק זה של הפעילות אנו מבקשים להכיר את המושג באופן איכותי למדיי. טיפול חצי כמותי יעשה בחלק ב של הפעילות, לכן ניתן להתייחס אל עוצמת ההארה בשלב זה כאל גודל, שניתן להעריך אותו באמצעות התבוננות בעינינו במשטח מואר. ניתן להציג רצף איכותי של עוצמות ההארה החל מיום מעונן וגשום, המשך ביום מעונן חלקית וכלה ביום קיץ בהיר. ניתן לציין כי העין רגישה לעוצמות ההארה, וגודל האישון משתנה בהתאם לעוצמת ההארה. ניתן לבצע בהקשר לזה ניסוי איכותי קטן.

נבקש מהתלמידים להתבונן האחד בעיני חברו ולהתרשם מגודל האישון. השאלה שתעמוד לדיון תהיה מה יקרה, כאשר נכבה את האור בכיתה? האם האישון יגדל, יקטן או יישאר ללא שינוי. התלמידים יתבקשו להבהיר את עמדתם. לאחר מכן נכבה את האור בכיתה ונבקש מהתלמידים לעקוב אחרי השינוי בגודל האישון. יש להמתין כדקה לפני שניתן לראות את השינוי בתנאי האפלה. התוצאה היא ששטח האישון גדל. למעשה, העין היא חיישן תאורה המשנה את גודלו בהתאם לתנאי התאורה. ככל שעוצמת ההארה קטנה כך גדל שטח האישון ולהפך. למעשה, לעין יש מנגנון המאפשר להגדיל את שטח האישון בתנאי תאורה נמוכים במטרה לאסוף אור משטח גודל יותר.

הפוטומטר שאנו עומדים לבנות מתואר בפירוט בחוברת לתלמיד. לוחות הפלסטיק הלבן של הפוטומטר נחתכו בגודל של 6 X 6 ס"מ מלוח חיתוך ירקות. תפקידו של רדיד האלומיניום הוא לבודד מבחינה אופטית בין שני חלקי הפוטומטר, כך שלא תהיה השפעה של עוצמת ההארה מצד אחד של הפוטומטר על צדו השני. בפוטומטר מתרחשים ארבעה תהליכים אופטיים: שבירה, פיזור, בליעה והחזרה.



איור 1: תיאור סכמתי של הפוטומטר המשווה בפעילות.
ההתבוננות בפוטומטר נעשית מהצד הצר של הפוטומטר.



תשובות לשאלות בחלק א'

1. ככל שמקרבים את הנורה אל הפוטומטר, הצד הפונה אל הנורה הולך ונעשה בהיר יותר, בעוד שהצד השני נשאר אפל. השוואה בין שני הצדדים מראה שקיים הבדל בין עוצמות ההארה. הצד המופנה אל המנורה הוא בעל עוצמה גבוהה יותר.

2. בתחילת הניסוי עוצמת ההארה של הצד הפונה אל הנורה בהספק 150 וט גדולה יותר מזו הפונה אל הנורה בהספק של 75 וט, שכן שתי הנורות נמצאות במרחק שווה, 1 מטר, משני צדי הפוטומטר. ככל שמרחיקים את נורת 150 וט, כך קטנה עוצמת ההארה.
במרחק של כ-140 ס"מ שתי עוצמות האור אמורות להשתוות. כאשר המרחק של נורת 150 הווט עולה על 140 ס"מ, תקטן עוצמתה מזו של נורת 75 הווט.

3. כפי שצוין בתשובה לשאלה 2 מרחק זה אמור להיות כ- 140 ס"מ בהתאם לחוק של ירידת עוצמת ההארה ביחס ישר לאחת חלקי המרחק בריבוע. מאחר שהספק הנורה הגדולה הוא פי שניים מהספק הנורה הקטנה, הרי שבמרחק השווה ל-1.41 = 2 מטרים עוצמת ההארה אמורה להשתוות. זוהי גם התוצאה בקירוב +/- 8 ס"מ במדידות בכיתה.

4. התייחסנו אל שאלה זו בתשובה הקודמת.

5. הפוטומטר הוא, כאמור, פוטומטר משווה, שתפקידו להבחין בין שתי עוצמות הארה. יש להתבונן בחלק הדק של הפוטומטר כדי להשוות בין שתי עוצמות ההארה. בהמשך ננצל פוטומטר זה להשוואה בין שתי עוצמות אור, האחת של השמש והשנייה של נורה.

ניתן להשתמש גם בפוטומטר משווה פשוט יותר - דף נייר עם כתם שמן במרכזו. מתברר שכתם השמן פועל בדרך דומה לפוטומטר המשווה. כאשר עוצמת האור מהצד הנגדי גבוהה יותר, כתם השמן נראה בהיר יותר מאשר הנייר, שכן הנייר ספוג השמן מעביר טוב יותר את האור בהשוואה לנייר רגיל. כאשר מתבוננים דרך הנייר אל עוצמת אור נמוכה יותר, כתם השמן נראה כהה יותר. אם שתי עוצמות ההארה שוות משני צדי הדף, כתם השמן נעלם.



חלק ב: חקירת הקשר שבין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי

1. חקירה בעזרת פוטומטר

חלק זה מאפשר לתלמיד להכיר את הקשר שבין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי. מורים רבים מציגים את הנושא כבר בראשית לימודי האופטיקה. אם כבר לימדת נושא זה, תוכל לבחון אחת משלוש האפשרויות:

א. להציג את הנושא בדרך פשוטה וקלה, כפי שהיא מופיעה בתדריך, כשכל קבוצת תלמידים מבצעת את הניסוי.

ב. לערוך הדגמה כאשר כל הכיתה צופה בה. במקרה זה ניתן לבצע את ההדגמה של חלק שני - חקירה בעזרת ספירת משבצות, בעזרת מטול שקפים שעליו תניח את הבריסטול המחורר. במקרה זה ניתן להתרחק מהמסך בקפיצות של מטר.

ג. להישען על הידע המוקדם של התלמידים ולעבור לחלק השלישי של הפעילות.

חלק הראשון בפעילות עוסק בניסיון לברר אם לתלמידים יש הערכה לגבי הקשר בין עוצמת ההארה למרחק. יש להניח שהתלמידים כבר יודעים שככל שמתרחקים ממקור האור, יורדת עוצמת ההארה, אך הם אינם יודעים מהו הקשר המתמטי, שאותו אנו מנסים לגלות בפעילות זו.

בעקבות הפעילות הקודמת שביצעו התלמידים, יש לשער שפיתחו הערכה לגבי המקום שבו יש להציב את הנורה בת 75 הווט, כאשר נורת 150 הווט נמצאת במרחק שני מטרים. יחד עם זאת לחלק מהתלמידים הדבר אינו מובן, וזוהי הזדמנות לשוחח ולבחון זאת שוב.
ניתן להסתפק בפעילות זו ולהציע את היחס הידוע שבין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי. אך אם ברצונך לחקור את הנושא יחד עם תלמידיך בצורה כמותית, עבור לחלק הבא של הפעילות.



2. חקירה בעזרת ספירת משבצות

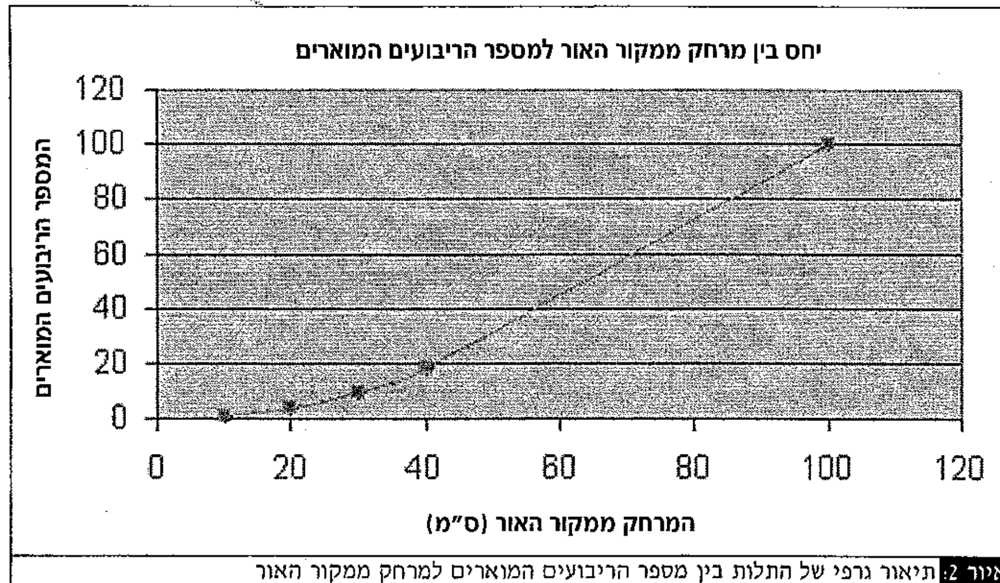
מטרת הפעילות להגיע ליחס כמותי בין עוצמת ההארה לבין המרחק ממקור אור נקודתי. תיאור הניסוי בחוברת התלמיד מפורט למדיי. חלק זה של הפעילות דורש התארגנות מעבדתית עם ציוד פשוט המכיל מרכיבים רבים.

לפניך תוצאות שנאספו בכיתת ניסוי:

מרחק הדף המשובץ מהנורה (בס"מ)	מספר הריבועים המוארים	איזה חלק מהאור מקבלת כל משבצת?	מספר הנורות שיאירו בעוצמה זהה לנורה אחת שמרחקה 10 ס"מ
10	1	1	1
20	4	1/4	4
30	10	1/10	10
40	18	1/18	18
100	100	1/100	100

טבלה 2: תוצאות המדידה של עוצמת ההארה ביחס למרחק ממקור אור נקודתי

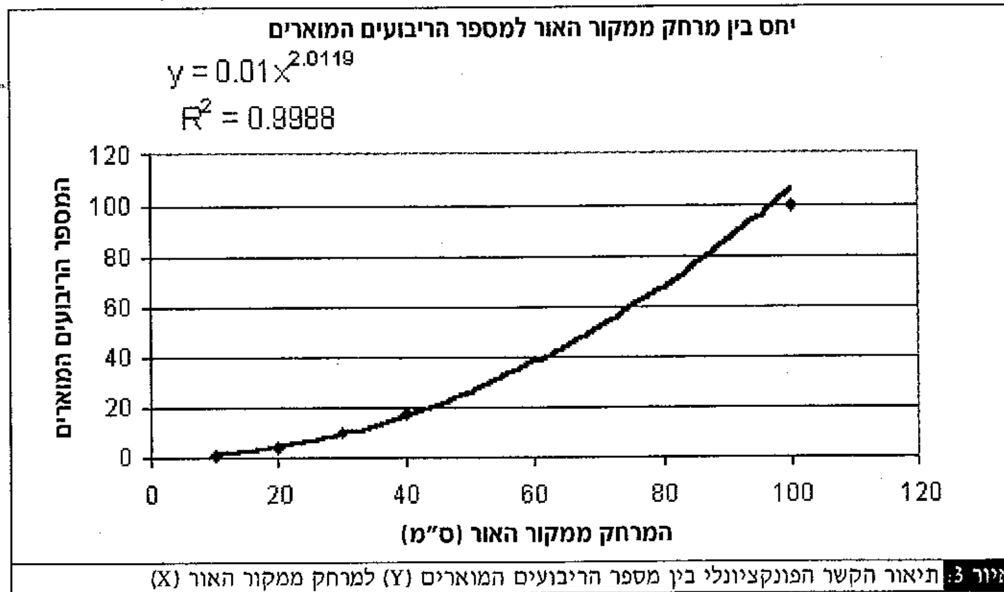
עיבוד שתי העמודות הראשונות לגרף, כאשר העמודה השנייה מייצגת את ההופכי של עוצמת ההארה, נותנת את התוצאות הבאות:



איור 2: תיאור גרפי של התלות בין מספר הריבועים המוארים למרחק ממקור האור



בעזרת גיליון Excel בוצע עיצוב קו מגמה של הגרף, והתקבלה התוצאה הבאה:



איור 3: תיאור הקשר הפונקציונלי בין מספר הריבועים המוארים (Y) למרחק ממקור האור (X)

ניתן לראות כי קיים יחס ישר בין המרחק בחזקה שנייה לבין ההופכי של עוצמת ההארה, שהוא היחס המבוקש.

כלומר:

$$\frac{1}{I}\ \alpha R^2$$

או בצורה המוכרת לנו:

$$I\ \alpha\ \frac{1}{R^2}$$

חלק ג: מדידת הספק השמש

מטרת החלק הזה היא להשתמש בחוקי האופטיקה הגיאומטרית ובנתון של מרחק הארץ מהשמש כדי לבצע מדידה פשוטה, שממנה ניתן יהיה להסיק את הספק השמש. נציין כי מדידת המרחק אל השמש נדון בפירוט בהרחבות הפיזיקליות המצורפות לפרק זה. אין צורך להציג את הנושא בפני התלמידים בשלב זה אלא להסביר ששיטות המדידה של מרחקים בחלל יידונו בהמשך, וכעת יש לקבל את המרחק מכדה"א אל השמש כנתון מדעי, שדרך מדידתו תובהר בהמשך.

תיאור הניסוי מופיע בפירוט בחוברת לתלמיד. קיימת בעיה בביצוע הניסוי, שכן הצבע המתקבל מהנורה הוא בעל גוון אדמדם, בעוד שהצבע המתקבל מהשמש הוא בעל גוון בהיר. יש קושי מסוים להשוות בין שני הגוונים. ההבדל נובע מהטמפרטורה השונה של שני מקורות האור. בהנחה ששניהם קורנים קרינת חום (black body radiation), טמפרטורות



הנורה היא בערך 2,300 מעלות קלווין, בעוד שטמפרטורת השמש היא כ-5,800 מעלות קלווין. השוואה בין שתי עקומות אור האחת של 2,300 מעלות והשנייה של 5,800 מעלות מוצגת באיור הבא.

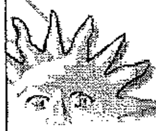
קרינת גוף שחור
ב-5,800 מעלות קלווין

קרינת גוף שחור
ב-2,300 מעלות קלווין

איור 4: השוואה בין הספקטרום של גוף בטמפרטורת השמש (K5,800)
לגוף בטמפרטורת חוט להט (K2,300)

מלבד ההבדלים בעוצמה ההשוואה מראה, שהתחום הנראה הוא בעל העוצמה המרבית בקרינה של 5,800 מעלות קלווין, בעוד שבקרינה של 2,300 מעלות קלווין העוצמה המרבית היא בתחום האינפרה אדום - מבין אורכי הגל בתחום הנראה האור האדום הוא הדומיננטי. זוהי הסיבה להבדלים בין צבעי הנורה לצבעי השמש.

לכן יש צורך לבקש מהתלמידים למרות קושי זה להעריך מתי, להערכתם, העוצמה שווה למרות הבדלי הצבעים בין שני הצדדים.



לפניך סדרה של מדידות שבוצעה על ידי זוג מורים בהשתלמות שהתקיימה בקיץ 1999 במכללת עמק הירדן.

מספר מדידה	המרחק בין הנורה לפוטומטר (בס"מ)
1	49
2	45
3	47
ממוצע	47

טבלה 2: תוצאות של מדידת מרחק הנורה מהפוטומטר המשווה

ניתוח תוצאות המדידה

במדידה זו ניצלנו את העובדה, ששתי עוצמות ההארה שוות, לכן ניתן לטעון כי עוצמת ההארה של השמש שווה לעוצמת ההארה של הנורה I_L

$$I_S = I_L$$

מתוך ידיעת הקשר בין עוצמת ההארה למרחק ממקור האור ניתן לטעון:

$$\frac{P_S}{P_L} = \left(\frac{R_S}{R_L}\right)^2$$

כאשר:

P_S = הספק השמש $\quad$ R_S = המרחק לשמש

P_L = הספק הנורה $\quad$ R_L = המרחק לנורה

נחלץ את הספק השמש P_S ונקבל:

$$P_S = \left(\frac{R_S}{R_L}\right)^2 X\, P_L = \left(\frac{1.5 X 10^{11}}{0.45}\right)^2 X\, 150 = 1.66 X 10^{25} \text{ watt}$$

זוהי תוצאה הקטנה בסדר-גודל אחד מהספק השמש, שהוא כידוע $4 X 10^{26}$ ווט.
ניתן להסביר את השוני בין הגודל שהתקבל במדידה בהשתלמות המורים, לבין התוצאה המצופה בכמה אופנים.

א. זוהי מדידה סובייקטיבית, שתלויה ברגישות עינו של המודד.

ב. מרבית הקרינה של חוט הלהט היא בתחום האינפרה אדום ולא בתחום הנראה, לכן ההספק החשמלי המנוצל להארה נמוך בהשוואה לאחוז הקרינה של השמש המנוצל להארה.

ג. חלק מקרינת השמש נבלע ומפוזר באטמוספרה ואינו מגיע לפני כדה"א, במיוחד שהמדידה נערכה בגובה 200 מטרים מתחת לפני הים.

ד. השוני בצבעים מקשה על ההשוואה בין עוצמת ההארה של שני לוחות הפוטומטר.



תשובות לשאלות לדיון מסכם

1. עוצמת ההארה של השמש במאדים, בהתחשב בהשפעת המרחק בלבד, קטנה פי:

$$1.5^2 = 2.25$$

לכן גם עוצמת ההארה של הנורה צריכה להיות קטנה בהתאם, כלומר יש להרחיק את הנורה פי 1.5 ממרחקה בכדור הארץ. לכן בהתחשב בתוצאות המדידה שהבאנו, יש להרחיקה למרחק של:

R מאדים = R ארץ 1.5 = 47 X 1.5 = 70.5 ס"מ

2. בדרך דומה לפתרון של השאלה הקודמת הפעם יש להקטין את המרחק בפרופורציה מתאימה, כלומר:

R נוגה = R ארץ 0.7 = 47 X 0.7 = 32.9 ס"מ

3. ההספק הממוצע של צריכת חשמל בישראל הוא 10 GW או 10^{10} וט. בשנה 31 מיליון שניות בקירוב, לכן האנרגיה החשמלית הנצרכת בישראל היא כ-$3 X 10^{17}$ גיאול.

4. נניח לצורך החישוב כי כמות האנרגיה הנצרכת ע"י תושבי ישראל היא בסדר-גודל אחד יותר מתושבי מכמות האנרגיה החשמלית שהם צורכים כלומר כ-$3 X 10^{18}$ גיאול.

5. מספרם של תושבי כדה"א הוא פי אלף לערך מתושבי ישראל בקרוב 6 מיליארד. לכן פישוט החישוב נניח שצריכת האנרגיה היא פי אלף מזו של ישראל, כלומר כ-$3 X 10^{21}$ גיאול.
זוהי הזדמנות טובה לבחון את עמדותינו בשלב "מה דעתך?". במקרה זה תושבי כדה"א צורכים בשנה כאחת חלקי 100,000 מכמות האנרגיה שפולטת השמש בשנייה.



פעילות 4: מדידת קוטר השמש דידקטיקה

מבוא

מטרת פרק זה היא להתמודד עם מדידה של גדלים בחלל. לשם כך יש לנצל את הידע של התלמידים בחוקי האופטיקה הגיאומטרית. הפרק נחלק לארבעה חלקים עיקריים: פעילות מבוא, היכרות עם חריר, מדידת קוטר השמש, דיון מסכם. היכולת לבצע מדידות אסטרונומיות מבהירה עד כמה שונים הגדלים, שאנו מנסים לחקור בשעה שאנו עוזבים את כדה״א.

חלוקת זמנים מומלצת לפעילות זו:
מה דעתך? - 10 דקות.
חלק א היכרות עם נפלאותיו של חריר - 15 דקות.
חלק ב קביעת קוטר השמש - 15 דקות.
ניתוח תוצאות וסיכום - 5 דקות.

מה דעתך?

קוטר השמש הוא גודל בלתי נתפס לשוכני כדה״א הרגילים למדוד את המרחקים במטרים, בק״מ או לכל היותר באלפי ק״מ. ממחקרים שנערכו מתברר שתלמידים רבים יודעים לומר שהשמש גדולה יותר מכדה״א, אך כאשר שואלים אותם שאלות עקיפות המנסות לברר את מבנה השמש או גודלה, הם מעריכים שהשמש דומה בצורתה ובממדיה לכדה״א. קיים פער בין הידע המוצהר לבין הידע שבו מאמינים התלמידים. במקרים רבים מתקשים תלמידים להאמין שהשמש עשויה מחומר במצב צבירה גזי. מטרת ״מה דעתך?״ לברר את עמדות התלמידים לפני תחילת הפעילות. שתי השאלות המופיעות ב״מה דעתך?״ עוסקות בשני הנושאים העיקריים של הפעילות: ממדי השמש, קבלת דמות בעזרת חריר.

1. הטענה מתבססת על מדידת המרחק אל השמש, כפי שמוסבר בנספח הפיזיקלי. ידיעת המרחק לשמש וידיעת היחס בין קוטרה לבין המרחק אליה מאפשרות הערכה של גודלה. ללא ידיעת המרחק אל השמש לא ניתן להעריך את גודלה. בעקבות הערכות לגבי גודלה של השמש ולאחר גילוי חוק הכבידה העולמי בסוף המאה ה-17, ניתן היה לקבל אומדן לגבי מסת השמש.
2. תלמידים רבים נוטים לחשוב שצורת החריר משפיעה על צורת הדמות המתקבלת. לכן יש לשער שחלק משמעותי מתלמידיך יחשבו שהדמות שתתקבל תהיה בעלת צורת משולש. למעשה, אם החריר אכן קטן דיו, מספר מילימטרים, הדמות שתתקבל תהיה בצורת השמש, כלומר עגולה.

לאחר שהתלמידים ענו בדרך אישית על השאלות, יש לקיים דיון קבוצתי, ולאחריו דיון במליאה. הדיון במליאה נועד לסכם את תשובות התלמידים ואת הנימוקים העיקריים לעמדותיהם, ואין להוסיף עליו את דעות המורה או את עמדותיו.



חלק א: היכרות עם נפלאותיו של חריר

פעילות זו מפגישה את התלמיד עם דמות המתקבלת לא על ידי מראה או עדשה, אלא על ידי "התקן אופטי", המעביר רק אלומה צרה מאוד מהאור הנפלט מנורה. לתלמידים שלא התנסו עד עתה בתופעה זו, זוהי פליאה גדולה.

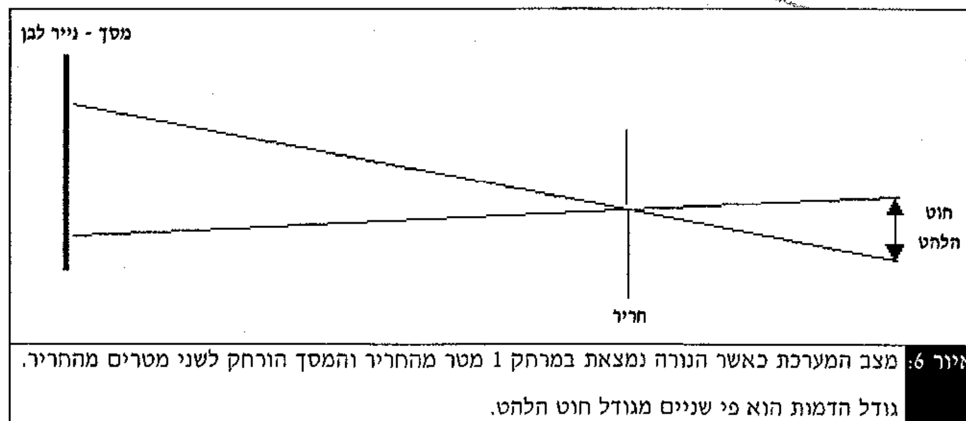
1. תלמידים רבים מעריכים שיתקבל על הנייר הלבן כתם אור עגול, הדומה בצורתו לצורת החריר.
לאחר התארגנות נכונה מופתעים התלמידים לגלות שעל הנייר הלבן התקבל כתם אור הדומה בצורתו לחוט הלהט של הנורה.

2. הדמות המתקבלת נוצרת עקב מעבר אור באלומה צרה. בעזרת דמיון משולשים ניתן להעריך מה יקרה לדמות, כאשר נרחיק את דף הנייר למרחק שני מטרים.



איור 5: מצב המערכת כאשר הנורה והמסך נמצאים במרחק 1 מטר משני צדדיו של החריר.
גודל הדמות הוא כגודל העצם חוט הלהט

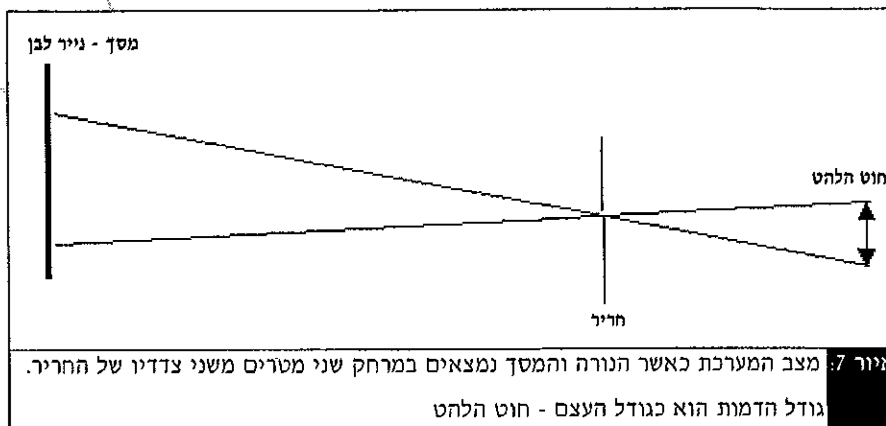
כאשר מרחיקים את הדף הלבן, ניתן להעריך בעזרת תרשים קרניים מה יקרה.



איור 6: מצב המערכת כאשר הנורה נמצאת במרחק 1 מטר מהחריר והמסך הורחק לשני מטרים מהחריר.
גודל הדמות הוא פי שניים מגודל חוט הלהט.



3. הרחקת הנורה למרחק שני מטרים גורמת לסימטריה של התמונה, כלומר גודל הדמות שווה לגודל העצם.



איור 7: מצב המערכת כאשר הנורה והמסך נמצאים במרחק שני מטרים משני צדדיו של החריר. גודל הדמות הוא כגודל העצם - חוט הלהט

4. התשובות לשאלות 2-3 ניתנו בעזרת תרשימי קרניים. יש לקוות שהתלמידים מודעים לנושא תרשימי הקרניים, שבעזרתם ניתן לפרש תופעות הקשורות באופטיקה גאומטרית.

5. יצירת דמות בעזרת חריר היא פלא בעיני המתבונן בפעם הראשונה. נורה המאירה קיר לבן אינה יוצרת שום דמות. דווקא ע"י החסרת חלק ניכר מהאור ניתן לפתע ליצור דמות. דיון מפורט בדמות המיוחדת של חריר מופיע בסוף המבוא הדידקטי. הסבר הדמות הנוצרת ניתן בעזרת תרשים קרניים פשוט. היופי הוא בכך שתרשים זה מאפשר להבין את הקשר שבין המרחק של המסך וחוט הלהט מהחריר לבין הפרופורציות של גודל חוט הלהט ודמותו.

6. בדיון הכיתתי רצוי להדגיש את הנקודות הבאות:
   א. יצירת דמות על ידי חיסור אור.
   ב. תרשים הקרניים כאמצעי לפענוח תופעות באופטיקה גאומטרית.
   ג. יכולת הניבוי של תרשים הקרניים.
   ד. דמיון משולשים כאמצעי לבדיקת יחסים בין גודל העצם לגודל הדמות.

שאלות להרחבה

1. ראוי לשנות את נוסח השאלה ולהחליף את המילה **שמש** בצירוף **חוט הלהט**. נוסח השאלה יהיה אם כן "מה יקרה לדמות חוט הלהט, אם נשנה את צורת החריר לצורה משולשת? התשובה היא שלא יחול שינוי משמעותי, כל עוד החריר קטן דיו, בגודל של מספר מילימטרים.

2. חריר נוסף יגרום להופעת דמות נוספת.

3. יש להניח כי לפחות בשאלה הראשונה חלק מהתלמידים יעריכו שהדמות שתתקבל תהיה בצורת משולש.

4. הצורה של דמות השמש תהיה דמות מרובעת, היטל של דמות השמש הקובייתית על משטח דו ממדי.



חלק ב: קביעת קוטר השמש

מטרת הפעילות למדוד את קוטר השמש בהנחה שהמרחק אליה ידוע. נושא מדידת המרחקים בחלל מטופל בהרחבה בפרק העוסק במדידת המרחק אל הירח. לפרק זה צירפנו נספח המתאר את ההיסטוריה של מדידת המרחק אל השמש. מדידת מרחק זה הייתה הבסיס למדידת מרחקים מחוץ למערכת השמש. כאמור, כאן אנו עוסקים במדידת קוטר השמש על בסיס ההיכרות עם דמות הנוצרת בעזרת חריר.

תיאור הניסוי מוצג בדרך מפורטת בתדריך לתלמיד. חשוב להדגיש שיש להחזיק את דף האלומיניום ואת הדף הלבן בניצב לאור השמש כמצוייר באיור 4 בחוברת התלמיד. ניתן לקבוע את ניצבות הדף בהתאם לגודל הצל שהוא יוצר. כאשר הדף ניצב לאור השמש, שטח הצל הנוצר על האדמה הוא השטח המרבי.

1. במדידה הראשונה, כאשר החריר נמצא במרחק 1 מטר מדף הנייר הלבן, תתקבל דמות בגודל של 9 מ״מ בקירוב.
2. במדידה הראשונה, כאשר החריר נמצא במרחק 1 מטר מדף הנייר הלבן, תתקבל דמות בגודל של 11 מ״מ בקירוב.
3. במדידה הראשונה, כאשר החריר נמצא במרחק 1 מטר מדף הנייר הלבן, תתקבל דמות בגודל של 14 מ״מ בקירוב.

ניתוח תוצאות המדידה

1. חישוב היחס בין קוטר הדמות למרחק שבין החריר לדף הנייר.

מספר מדידה	L מרחק בין חריר לדף הנייר (במ״מ)	D קוטר הדמות (במ״מ)	היחס L/D
.1	1000	9	111.1
.2	1250	11	113.6
.3	1500	14	107.1
ממוצע			110.6

טבלה 3: הקשר בין קוטר דמות השמש למרחק בין החריר לדף הנייר

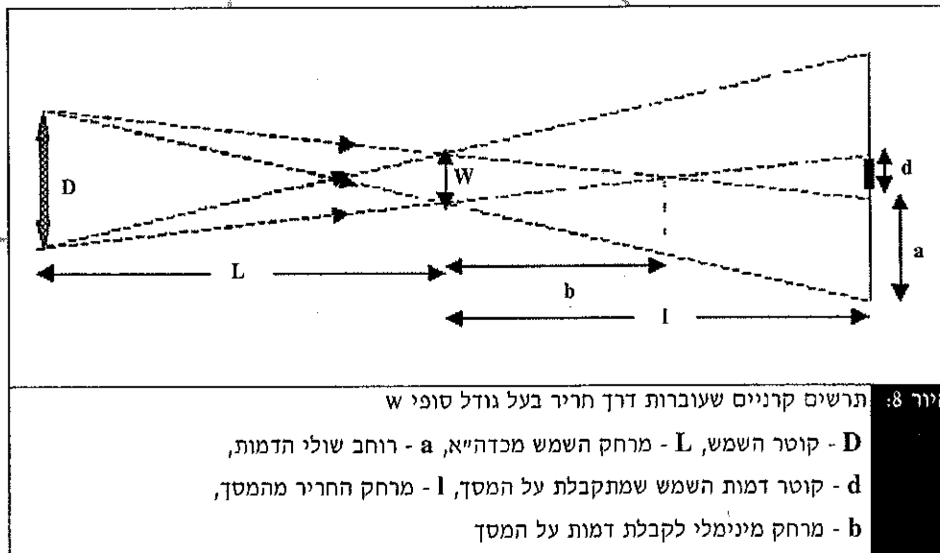
2. תוך הסתמכות על המסקנות מחלק א, העוסק בדמות המתקבלת על ידי חריר, ניתן להעריך שהיחס בין קוטר השמש לבין המרחק אליה הוא כ- 110.6.

3. בהסתמך על התוצאות בסעיף הקודם ניתן להעריך שקוטר השמש הוא המנה של המרחק ביחס 110.6. לפיכך מתקבל שקוטר השמש הוא: 1.35 מיליון ק״מ. תוצאה טובה למדיי בהתחשב באי-דיוקים של מדידה, הנובעים ממגבלות מכשור המדידה (סרגל בעל שנתות מילימטריות). קוטר השמש הוא כ-1.4 מיליון קילומטרים. בעזרת מדידה זו קיבלנו סדר-גודל סביר למדיי. רצוי להשוות גודל זה לקוטר כדה״א. להפתעתנו, נקבל שקוטר השמש גדול פי 110 מקוטר כדה״א. מצב מוזר, בהשוואה למערכת המושגים המוכרת לנו מחיי היומיום.



הרחבה - מדידת קוטר השמש בעזרת מראה

כדי להבין את אופן קבלת דמות השמש על מסך (קיר בניין) בעזרת מראה מישורית ואת המגבלות לגבי הגדלים והמרחקים שמתקבלים, נתבסס על מהלך הקרניים דרך שפופרת חריר, כאשר גודל החריר W סופי (החריר אינו נקודתי); המראה המישורית תמלא אז את תפקיד החריר, והדמות **המדומה** של השמש שנוצרת על-ידי המראה תמלא את תפקיד השמש, כפי שניתן לראות באיור 8. (הפרופורציות בתרשים רחוקות, כמובן, מאלו שבמציאות).
תחילה נברר במה תלוי המרחק המינימלי מהקיר, שבו עלינו לעמוד (b) כדי לקבל דמות של השמש על הקיר; לאחר מכן נגדיר תנאי לקבלת דמות ברורה, ונבדוק באיזה מרחק (l) נוכל לקבל אותה.



איור 8: תרשים קרניים שעוברות דרך חריר בעל גודל סופי w
D - קוטר השמש, **L** - מרחק השמש מכדה״א, **a** - רוחב שולי הדמות,
d - קוטר דמות השמש שמתקבלת על המסך, **l** - מרחק החריר מהמסך,
b - מרחק מינימלי לקבלת דמות על המסך

1. מהו המרחק המינימלי בין הקיר ובין המראה (b), כך שתתקבל על הקיר דמות?

כדי שתתקבל דמות ברורה, גודל השוליים **a** צריך להיות זניח ביחס לגודל הדמות **d**, כלומר צריך להתקיים:

$$a << d \quad (1)$$

התנאי הזה יושג, כאשר מרחק המסך מהחריר (ℓ) יהיה גדול בהרבה מהמרחק המינימלי הדרוש לקבלת דמות על המסך (**b**):

$$\ell << b \quad (2)$$

(רוחב החריר **w** קבוע, וכמובן **D** ו-**L** קוטר השמש ומרחקה מכדה״א קבועים.)



מדמיון משולשים נובע כי היחס בין רוחב החריר w ובין קוטר הדמות d שווה ליחס גובהי המשולשים - $b / (\ell - b)$:

$$\frac{w}{d - a} = \frac{b}{\ell - b} \qquad (3)$$

כאשר תנאים (1) ו-(2) מתקיימים, ניתן לכתוב את (3) בצורה הבאה:

$$\frac{w}{d} = \frac{b}{\ell} \qquad (4)$$

b הנו, כאמור, הגבול התחתון של הערכים שיכול לקבל l, מרחק המסך מהחריר (או מהמראה המישורית); נבדוק כיצד b תלוי בגודל החריר (או המראה) w.

לפי (4):

$$b = w \times \frac{\ell}{d} \qquad (5)$$

מדמיון משולשים:

$$\frac{\ell}{d} = \frac{L}{D} \qquad (6)$$

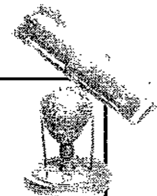
נציב (5) ב-(6):

$$b = w \times \frac{\ell}{D} \qquad (7)$$

נציב את הערכים המתאימים עבור השמש, ונקבל:

$$b \approx 110\ w$$

כלומר: מרחק המראה מהקיר צריך להיות גדול פי 110 לפחות מגודל המראה.

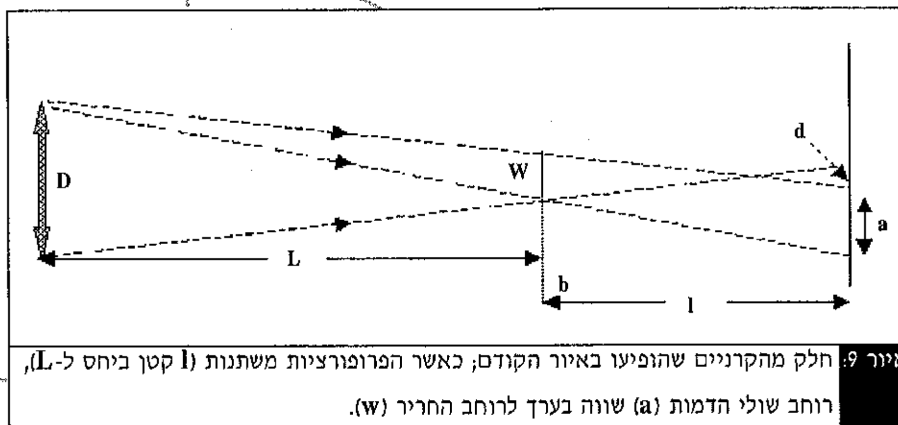


דוגמה: עבור מראה ריבועית שצלעה 4.5 ס"מ,
כאשר מרחק המסך קטן מחמישה מטרים,
מתקבלת על המסך תבנית מוארת שצורתה כצורת המראה;
רק במרחק גדול יותר מתקבלת דמות השמש העגולה.



2. איזה מרחק בין המראה ובין הקיר (l) דרוש, כדי שהדמות שתתקבל תהיה ברורה?

באיור 9 מוצג מהלך הקרניים שעוברות בחריר ויוצרות את דמות השמש בפרופורציות שונות במעט מאלו שבאיור 1 רוחק המסך מהחריר (l) קטן יותר; נראה עתה כי רוחב שולי הדמות (a) שווה בקירוב טוב לרוחב החריר (w), בתנאי ש - L << l.



איור 9: חלק מהקרניים שהופיעו באיור הקודם; כאשר הפרופורציות משתנות (l קטן ביחס ל-L), רוחב שולי הדמות (a) שווה בערך לרוחב החריר (w).

מדמיון משולשים מקבלים:

$$\frac{a}{w} = \frac{L + \ell}{L} \quad (9)$$

כלומר:

$$a = w \times \frac{L + \ell}{L} \quad (10)$$

התנאי לקבלת דמות ברורה הוא שגודל הדמות (d) יהיה לפחות כפול מגודל השוליים (a)

$$d \geq 2a \quad (11)$$

כלומר:

$$d \geq 2w \quad (12)$$

או:

$$\frac{d}{w} \geq 2 \quad (13)$$

מה יהיה אז מרחק המסך מהמראה?

לפי (5) ו-(8):

כלומר: $l = b \times \frac{d}{w} > 110\ w \times 2 \approx 220\ w$



הרחבה פיזיקלית

1. מדידות אסטרונומיות

א. מדידת קוטר השמש - היסטוריה

מתי הצליחו אנשים להעריך את המרחק אל השמש?
למרחק זה חשיבות רבה בהבנת גודל היקום בו אנו נמצאים, מקומנו ביקום זה ויכולתנו להעריך את חשיבותנו. בסקירה זו נתחיל בתקופה היוונית. האסטרונומיה נחשבה לאחד משני תחומי המדע החשובים ביותר בעיני היוונים. הפילוסוף הידוע אריסטו, בן המאה הרביעית לפני הספירה, והאסטרונום היווני תושב אלכסנדריה תלמי, בן המאה השנייה לספירה, הניחו שהארץ נמצאת במרכז היקום. ממדי היקום שלהם היו קטנים לפי מושגינו היום. יקומו של תלמי היה הגדול יותר, רדיוסו נאמד ב-80 מיליון ק"מ בערך.

אחת הסיבות לכך שהדגמים הראשונים של היקום היו זעירים נגרמה מהתפיסה הגאוצנטרית, שאילצה אותם להיות זעירים. הטיעון שהנחה אותם היה שאם הארץ קבועה במקומה והיקום כולו נע מסביבה, הרי שאחת ליום חייבת קליפת הכוכבים להשלים סיבוב סביב צירה. ככל שרדיוס הכדור המסתובב גדול יותר, נובע כי מהירות הכוכבים גדולה יותר. אילו היה רדיוס הכוכבים גדול יותר, מהירות הכוכבים הייתה גבוהה במידה לא סבירה גם על דעתם של מדעני העת העתיקה.
למרות הדעה השלטת בקרב המשכילים היוונים, שלפיה הארץ נמצאת במרכז היקום, היו שקמו לערער עליה ולהציע חלופות. הבולט מביניהם היה אריסטרכוס, שדגל בקוסמולוגיה ההליוצנטרית, המעמידה את השמש במרכז. גישתו זו קדמה לגישת קופרניקוס בכ-1,700 שנה. אריסטרכוס בן סמוס, אי מיוער ליד חוף אסיה הקטנה, טען כי השמש גדולה ומרוחקת מאתנו פי תשעה-עשר יותר מהירח. מסקנותיו היו שגויות מהבחינה המספרית. למעשה, השמש מרוחקת מאתנו פי ארבע-מאות מאשר הירח. אולי בשל מסקנתו על גודלה של השמש הגיע אריסטרכוס למסקנתו על מרחקה מאתנו.

אולם אי-אפשר לעמוד על התפתחות התאוריה שלו, כי הספר שבו הציג את התאוריה ההליוצנטרית אבד. אנו יודעים עליו מתוך מאמר שכתב ארכימדס בשנת 212 לפני הספירה. במאמרו "מונה החול" תיאר ארכימדס את תפיסתו ההליוצנטרית של אריסטרכוס (לא מתוך הסכמה עם תאוריה זו, אלא כדי להשתמש בממדיה לצורך אחר). ארכימדס חישב על סמך נתוניו של אריסטרכוס כי המרחק אל ספרת הכוכבים הוא שנת אור אחת. היום ידוע כי שנת אור אחת אינה אלא כרבע המרחק מהכוכב הקרוב ביותר. זו הייתה תוצאה מדהימה לזמנה. דגם הליוצנטרי שמחוגו גדול מיקומו של תלמי פי מאה אלף. והוא תואר 400 שנה לפני הולדת תלמי! אילו היטה העולם אוזן, היינו מדברים על המהפכה האריסטרכית, לא על המהפכה הקופרניקית, ומעולם המדע היו נחסכות אלף שנים של הליכת שולל.

קופרניקוס נולד ב-1473 בצפון פולין לתקופת לבלוב הרנסנס ולתקופת הדפוס, שהומצא 30 שנה לפני הולדתו ואפשר הפצה במהדורות רבות של הספרים החשובים מהעת העתיקה. קופרניקוס התעמק בספרי המדע מהעת העתיקה



וב"אל מגסטי" של תלמי, וגילה כי המערכת התלמאית אינה פועלת היטב. בספרו "על הסיבובים" (De Revolution) הציג קופרניקוס חלופה לתפיסת העולם התלמאית, ההשערה ההליוצנטרית. הוא השתכנע שכוכבי-הלכת צריכים לנוע במעגלים מושלמים סביב השמש. הנחה זו לא עלתה בקנה אחד עם התצפיות, וייתכן שזו הסיבה שגרמה לעיכוב בהוצאת ספרו המפרסם ברבים תאוריה זו. סיבה אחרת לעיכוב הופעת הספר הייתה החשש המוצדק של קופרניקוס מפני עמדת הכנסייה, שאותה הכיר היטב, שהרי היה נזיר קתולי. קופרניקוס קבע במדויק את ממדיהן היחסיים של מסילות כוכבי-הלכת. הוא לא הצליח למדוד את מרחקי הפלנטות מהשמש, אך פיתח שיטה למדידת המרחקים היחסיים. לכן אילו נתאפשרה מדידתו בפועל של אחד מרדיוסי המסלולים, היו כל השאר מתקבלים מאליהם. ובכלל זה גם מסילת כדה"א, כלומר מרחקו של כדה"א מהשמש.

ארבע שנים לאחר מותו של קופרניקוס ב-1543 נולד טיכו ברהה בדנמרק. טיכו ברהה, גדול האסטרונומים התצפיתיים של המאה השש-עשרה, התווה את מקומות כוכבי-השבת ואת נתיבי כוכבי-הלכת, לילה-לילה, במשך יותר מעשרים שנה. הנתונים שנצברו כך היו מדויקים כפליים ומעלה מאלה שנצברו עד ימיו, די מדויקים כדי לפענח צפונותיה של מערכת השמש. אלא שטיכו היה איש התצפית ולא איש התאוריה. לאחר שגלה ממולדתו, התיישב ברהה בפראג. ב-4 בפברואר 1600 התייצב בטירת בנטק שליד פראג יוהן קפלר, איש תאוריה שהפך את לוחותיו של טיכו לתאוריה יחידה, מדויקת ופשוטה. טיכו וקפלר החלו את עבודתם המשותפת, אך טיכו לא נחפז לחשוף בפני קפלר הצעיר את קלפיו והטיל עליו לפתור את חידת מאדים. מקומו בשמים של מאדים נקבע בדיוק נמרץ ביותר בשל קרבתו אל הארץ. הוא חשף יותר מכל כוכב-לכת אחר את מגרעותיהם של הדגם התלמאי והקופרניקני במסלולו המיוחד. קפלר בחן את תנועתו של מאדים במשך כעשר שנים. בינתיים ב-24 באוקטובר 1601 מת טיכו, וקפלר נתמנה ליורשו בתפקיד המתמטיקאי הקיסרי. הוא המשיך בחיפושיו אחר תאוריה יחידה ופשוטה שתסביר את תנועת מאדים. קפלר כתב: "שגיאתי הראשונה הייתה נעוצה בהנחתי כי המסילה שבה נעים כוכבי-הלכת היא מעגל". קפלר ויתר על רעיון המעגל המושלם והתקדם לעבר הפתרון או מה שקרוי כיום "חוקי קפלר".

1. צורת מסילתו של כוכב-לכת אינה מעגלית, כפי שחשבו היוונים וקופרניקוס לפניו, אלא **אליפסה**, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיה.
2. המחוג המתבר בין השמש לכוכב-הלכת מכסה בזמנים שווים שטחים שווים.
3. החזקה השלישית של מרחק הפלנטה מהשמש נמצאת ביחס ישר לריבוע זמן הקפתו את השמש.

כעת בשלו התנאים למציאת מרחק כדה"א מן השמש על-פי היחסים שנקבעו במדויק בתצפית על מאדים ונוגה ותוך הנחות נוספות.

ב-15 בפברואר 1564, עשרים שנה אחרי פרסום ספרו של קופרניקוס "על הסיבובים", נולד גלילאו בפיזה שבאיטליה. בימיו הומצא הטלסקופ, והוא שכלל אותו והיה האסטרונום הראשון שהפנה אותו אל הכוכבים. גלילאו פרסם את תצפיותיו לראשונה במארס 1610 בספרו "שליח הכוכבים". קפלר שכבר היה ידוע כאסטרונום המעולה בעולם הביע את תמיכתו הנלהבת ב"שלית הכוכבים" וסייע בכך בבלימת הביקורת שכוונה אל גלילאו בעקבות הספר. גלילאו דיווח לעולם על ירחי צדק, המכתשים על הירח, טבעות שבתאי, מופעי הנוגה, כוכבים נוספים בשמים ותגליות נוספות. הוא נאבק עם הכנסייה הקתולית על נכונותה של תורת קופרניקוס, הכנסייה מחרימה את "על הסיבובים" של קופרניקוס, וגלילאו מוזהר מפני הגנה על התאוריה ההליוצנטרית. בסופו של דבר גלילאו נשפט בפני הכנסייה ברומא וגזר-דינו מעצר-בית לכל ימי חייו. ב-1642 מת גלילאו בביתו, ובדיוק בשנה זו נולד ניוטון אייזיק בלינקולנשייר.



ניוטון מגלה שורה של חוקי טבע, וביניהם את חוק הכבידה העולמי. הודות לחוק הכבידה ניתן להסביר את התנועות האלה ולנבא אותן על-פי מתכונת דינמית תקפה מבחינה מתמטית, שחבקה את הפיזיקה השמימית. המרחקים היחסיים אל השמש וכוכבי-הלכת היו מובנים היטב, אך לא המרחקים המוחלטים. קופרניקוס מדד את הפרופורציות של מערכת השמש עם סטייה של 5% מהערכים הנכונים, קפלר התקרב לאמת עוד יותר ממנו. מכוח המסורת בוטאו המרחקים היחסיים במונחי המרחק מהארץ לשמש, גודל הקרוי יחידה אסטרונומית. אבל ערכה של היחידה האסטרונומית טרם נקבע. קביעת המרחק אל השמש או אל כל כוכב-לכת אחר הייתה מסייעת בקביעת יתר המרחקים במערכת השמש. מדידת המרחק הייתה מאפשרת גם את קביעת גודלן של הפלנטות שאת קוטרן הנראה ניתן היה למדוד בדיוק רב תוך שימוש בעינית מיקרומטרית שהוצמדה לטלסקופ משוכלל.

אומדן המרחקים הממוצעים של כוכבי הלכת מהשמש (ביחידות אסטרונומיות)

	קופרניקוס	קפלר	המאה העשרים
כוכב חמה	0.3763	0.389	0.387
נוגה	0.7193	0.724	0.723
ארץ	1	1	1
מאדים	1.5198	1.523	1.524
צדק	5.2192	5.2	5.202
שבתאי	9.1743	9.510	9.539

שתי שיטות היו מקובלות למדידת מרחקים:

1. שיטת המיקרומטריה השיטה התבססה על השוואת היחס שבין קוטרו הנראה של כוכב עם הקוטר האמיתי שלו. את קוטרו האמיתי קבע האסטרונום על-פי ניחושיו. נקל לשער את מידת הדיוק במדידה זו.
2. שיטת הפרלקסה - פרלקסיס ביוונית ערכה של זווית. אם שני אסטרונומים צופים בכוכב-לכת בעת ובעונה אחת משתי נקודות שהמרחק ביניהן מגיע לאלפי קילומטרים, ייראה מקומו של כוכב-הלכת על רקע שדה הכוכבים שונה במקצת לעיני שני האסטרונומים. אם אפשר למדוד את הזווית הזו ואת קו הבסיס המפריד בין שני האסטרונומים, אפשר לחשב בדייקנות את המרחק לכוכב-הלכת תוך שימוש פשוט בגאומטריה של אויקלידס. לפרלקסה היה בסיס תיאורטי איתן, אבל היה צורך לדעת בדיוק את המרחק בין שתי נקודות התצפית, ולשם כך היו נחוצות מפות בין-יבשתיות מדויקות ביותר. היה צורך לבצע את המדידות בעת ובעונה אחת כדי לנטרל שגיאות הנובעות מסיבוב כדה"א סביב צירו ומתנועת כוכבי-הלכת. לשם כך היו נחוצים שעונים מדויקים ביותר.

בסוף המאה השבע-עשרה חלה התקדמות רבה בתחום שרטוט המפות בשל הצורך בהן במסעות הימיים, כמו-כן שופרו שעוני המטוטלת. ב-1672 בדקה משלחת בינלאומית בראשות האסטרונום הצרפתי זיאן רישר את הפרלקסה



של מאדים. הוא הפליג לקיין שבחוף אמריקה הדרומית, שם צפה רישר במאדים, שנמצא במרחק הקרוב ביותר לכדה"א. מדידה מתואמת נעשתה באדמיה הצרפתית ממנה באו. הנתונים פוענחו, וערכה של היחידה האסטרונומית נקבע **כמאה וארבעים מיליון ק"מ**, כאשר המספר הנכון הוא 150 מיליון ק"מ.

נוגה מגיעה קרוב יותר לכדה"א מאשר מאדים, ולפיכך מדידת הפרלקסה שלה צריכה להיות יותר קלה, אלא שבהתקרבה היא מתמזגת בזוהר השמש. פעמיים בצמד אירועים, שפחות ממאה שנה מפרידות ביניהם, עוברת נוגה במישרין לפני השמש. אז היא נראית כמעגל שחור על רקע דיסקת השמש.
את המרחק אל נוגה אפשר יהיה למדוד אם בשתי נקודות תצפית המרוחקות זו מזו ייקבע המועד המדויק של כניסת נוגה לדיסקת השמש או יציאתה ממנה. מדענים שונים החמיצו את זוגות המעברים שנוגה ביצעה אם מפני שנולדו לפרק-הזמן, שבו נוגה אינה מבצעת את המעברים ואם בשל קשיים אחרים: עננות וקשיים טכניים אחרים.

משלחת בראשות המדען ג'וזף בנקס הייתה אחת מהמשלחות המשוכללות שיצאו לצפות במעבר הנוגה. היא הפליגה מפלימות ב-26 באוגוסט 1768 בראשותו קפטן ג'יימס קוק, נווט מומחה, מודד ימי ומתמטיקאי שלמד בעצמו אסטרונומיה. קוק ובנקס הקימו בטהיטי מצודת מצפה במקום שנקרא מאז כף נוגה, וממנה נצפה המעבר ב-3 ביוני 1769 בשמים כחולים, נקיים מענן.

קביעת מועד המעבר של נוגה התגלתה כבעייתית. לנוגה אטמוספרה סמיכה, השוברת ומפזרת את אור השמש בעת שהוא עובר דרכה, משום כך דיסקית כוכב נוגה לא נראית חדה בעת המעבר, ולכן לא ניתן לקבוע חד-משמעית את רגע הכניסה לדיסקה. בין שתי נקודות התצפית נתגלע הבדל של עשרים שניות. על אף ההבדל היבו הנתונים שנאספו אומדן למדידת מרחק הארץ מהשמש, שאינו סוטה ביותר מעשרה אחוזים מהערך הנכון. לימים נמדדה היחידה האסטרונומית בדיוק רב יותר על-ידי מדענים, ששרטטו משולשים מדומים משוכללים יותר ויותר אל נוגה בעת מעבריה במאה התשע-עשרה, אל מאדים כשהיה בניגוד ב-1877 ואל עשרות אסטרואידים, כשאלה עברו על פני כדה"א.

כיום מודדים את המרחק אל הפלנטות על-ידי שידור אות רדאר אל הפלנטה לנקודה הנמצאת על קו הראייה של המשדר. מחשבים את המרחק שהקרן עברה לפי מכפלת המהירות בזמן ומחלקים בשתיים.

ב. שיטת הפרלקסה

שיטת המדידה של מרחקים במערכת השמש מבוססת על שיטת הפרלקסה. בשיטה זו נקבע המרחק של פלנטה בעזרת כוכב מרוחק יותר. כיצד ניתן היה למדוד את המרחק אל השמש בשיטת הפרלקסה? כאשר השמש מאירה, לא ניתן לצפות בגרמי-שמים אחרים (למעט הירח), בשל עוצמת הקרינה של השמש. לכן יש צורך לבצע מדידה עקיפה של פרלקסת השמש. המדידה תישען על שני שלבים:

א. מדידת זווית הפרלקסה ומאפייני המסלול (אקסצנטריות, זמן סיבוב סביב השמש ביחס לכוכבים T - siderial) period) של גוף שלישי (פלנטה או אסטרואיד) במערכת השמש.

ב. שימוש בחוק השלישי של קפלר כדי למצוא את יחס a / a_e, ובעזרתו לחשב את הפרלקסה האופקית של השמש P_e.



לפי החוק השלישי של קפלר:

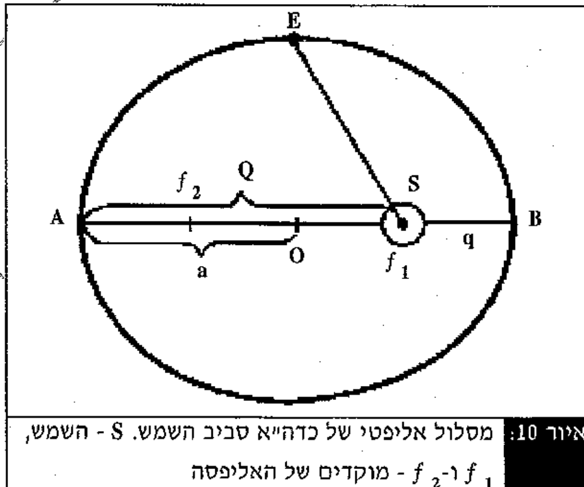
$$\left(\frac{a}{a_o}\right)^3 = \left(\frac{T}{T_o}\right)^2$$

כאשר:

a_o =. 1a .u = מרחק הארץ מהשמש.

T_o = זמן סיבוב של כדה״א סביב השמש, הערך המקובל 366.2422 ימים.

ג. יחידות במדידת מרחקים באסטרונומיה



איור 10: מסלול אליפטי של כדה״א סביב השמש. S - השמש, f_1 ו-f_2 - מוקדים של האליפסה

יחידות המרחק המקובלות בפיזיקה הארצית מטר וקילומטר אינן מתאימות כאשר אנו עוברים למדידת מרחקים במערכת השמש. יחידות המרחק המקובלות במערכת השמש נשענות על ״יחידה אסטרונומית״ (astronomical unit), שמציינת את המרחק הממוצע בין כדה״א לבין השמש. כאשר עוברים למדידת מרחקים בין כוכבי הגלקסיה, יש להשתמש ביחידת מרחק חדשה פרסק (parsec), שמציינת את היחס שבין גובה משולש, שזווית הראש שלו היא שנית קשת אחת לבין הבסיס שלו, שגודלו יחידה אסטרונומית אחת.

במילים אחרות, זהו המרחק של גוף שהפרלקסה שלו היא שנית קשת אחת, כאשר צופים בו משתי נקודות שהמרחק ביניהן הוא יחידה אסטרונומית אחת.

$$1\ par\ sec = \frac{360 \times 60 \times 60}{2\ \pi}\ a.\ u. \approx 206265\ a.\ u.$$

כיצד מגדירים יחידה אסטרונומית?

נוכחנו בחשיבות הרבה במדידות מדויקות של יחידה אסטרונומית. לשם כך אנו זקוקים להגדרה ברורה של יחידה אסטרונומית, מפני שהמרחק בין השמש לבין כדה״א משתנה ללא הרף בגלל אליפטיות המסלול של כדה״א. באיור 10 מוצג מסלול של כדה״א סביב השמש. ניתן לאפיין את המסלול האליפטי בעזרת המרחק בין שני מוקדי האליפסה **f1** ו-**f2** ואורך הציר הגדול **AB = 2 a**.

אקסצנטריות של אליפסה e מוגדרת בעזרת היחס:

$$e = \frac{Of_1}{OB}$$



נקודות A ו-B על מסלול כדה״א E (או פלנטה אחרת הסובבת סביב השמש) מסמנות את המרחק הגדול ביותר מהשמש במסלול האליפטי (Q) ואת המרחק הקטן ביותר במסלול (q).

ניתן לקבוע את ערכם של המרחקים הקיצוניים בעזרת הקשרים:

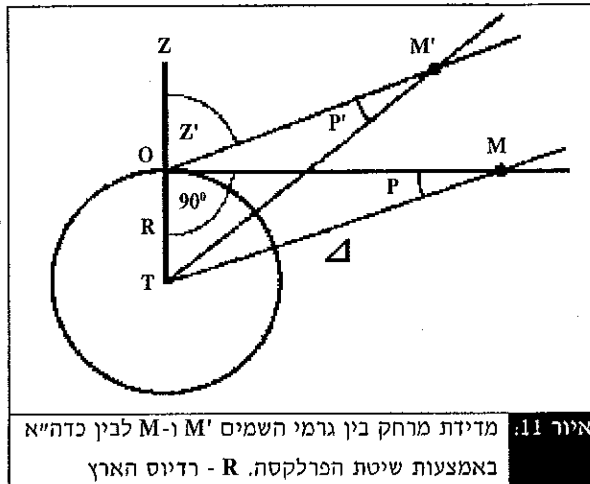
$$q = a \times (1 - e) \qquad Q = a \times (1 + e)$$

היחידה האסטרונומית מוגדרת כמרחק ממוצע בין השמש לבין כדה״א:

$$a = \frac{q + Q}{2}$$

מדידת מרחקים בשיטת הפרלקסה

על מנת למדוד מרחק בין כדה״א לבין גוף כלשהו במערכת השמש, משתמשים בשיטת פרלקסה. זווית הפרלקסה P' נוצרת בין שני הכיווני תצפית אל גרם השמים M' משתי נקודות שונות על פני כדה״א (איור 11). נהוג לבחור בתור הכיוונים הללו את קו הראייה OM' של תצפיתן ואת הקו המחבר בין ה-M' לבין מרכז של כדה״א T. במקרה זה זווית P' נקראת פרלקסת-יממה. מהאיור נובע, כי זווית הפרלקסה תהיה מקסימלית (P), כאשר הגורם M ייראה ליד האופק ממקום התצפית O. הזווית המקסימלית P נקראת פרלקסה אופקית.



איור 11: מדידת מרחק בין גרמי השמים M' ו-M לבין כדה״א באמצעות שיטת הפרלקסה. R - רדיוס הארץ

מתוך המשולשים TOM' ו-TOM מקבלים:

$$\frac{R}{\Delta} = \frac{\sin p'}{\sin z'} \qquad \frac{R}{\Delta} = \sin p$$

מכאן:

$$\sin (p') = \sin (p) \times \sin (z')$$

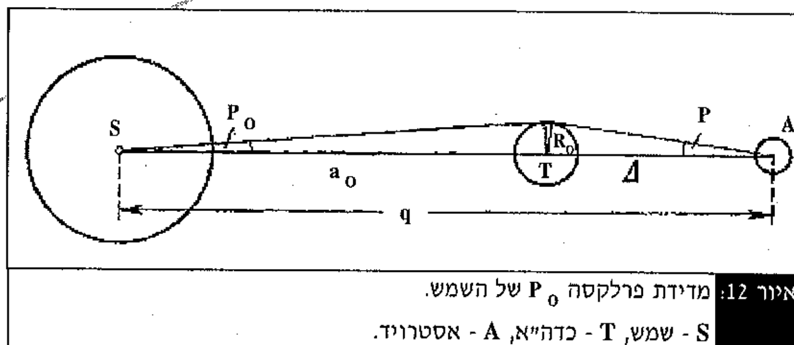
פרלקסות אופקיות של גופים במערכת השמש קטנות. לדוגמה, פרלקסה של הירח 57', פרלקסה של השמש 8.79'', פרלקסות של פלנטות קטנות מ-1'. לכן בנוסחה האחרונה ניתן להחליף את sin p ו-sin p' בזוויות p ו-p' (הנמדדות ברדיאנים): $p' = p \sin z'$

כאשר הרדיוס של כדה״א והפרלקסה האופקית של השמש ידועים, ניתן לחשב את המרחק בין השמש לבין כדה״א (איור 12). דיוק החישוב כולו נקבע על-ידי דיוק המדידה של זווית הפרלקסה. אך בגלל רוחק השמש וסטיות גדולות הנוצרות בזמן תצפית, כאשר טלסקופ מתחמם על-ידי קרינת השמש, אי-אפשר להגיע לדיוק סביר במדידה ישירה של פרלקסת השמש.



מדידה של פרלקסת השמש בדרך עקיפה

בשל הקושי למדוד בדרך ישירה את פרלקסת השמש, יש להיעזר בדרך עקיפה כדי ערך מדויק של פרלקסת השמש. הדבר ייעשה באמצעות מדידת פרלקסה של אחד מן האסטרואידים המתקרבים לכדה״א למרחק, שהוא קטן מהמרחק בין כדה״א לשמש. נתבונן באיור 12.



איור 12: מדידת פרלקסה P_o של השמש.
S - שמש, T - כדה״א, A - אסטרויד.

נניח שבזמן הנתון האסטרואיד A, כדה״א T ו- השמש S נמצאים על קו ישר, כך שהמרחק בין כדה״א לבין השמש שווה ל- a_o - המרחק הממוצע, 1 a.u. והאסטרויד נמצא במרחק הקרוב ביותר לשמש: $q = a(1 - e)$, כאשר a - המרחק הממוצע בין האסטרויד לשמש, ו-e - האקסצנטריות של מסלולו. מאיור 12 נובע:

$$R_o = a_o \sin P_o$$

ו-

$$R_o = \Delta \sin p = (q - a_o) \sin P = [a(1 - e) - a_o] \times \sin p$$

מהשוואה בין הנוסחאות ומתוך ההנחה ש- $\sin p = p$ נקבל:

$$a_o p_o = [a(1 - e) - a_o] \times p$$

או:

$$p_o = \left[\frac{a}{a_o} (1 - e) - 1 \right] \times p$$

המשוואה האחרונה מבהירה כיצד מחושבת פרלקסת השמש בדרך עקיפה. היחס a / a_o מחושב לפי החוק השלישי של קפלר. מאחר שידוע זמן המחזור של כדה״א To וזמן המחזור של האסטרואיד T, מתקבל מיד היחס a / a_o. מדידת זווית הפרלקסה p ואקסצנטריות e של מסלול של אסטרואיד מתבצעות תוך איסוף נתונים לגבי מיקום האסטרואיד לאורך זמן ההקפה - T. אסטרואיד שנוהגים להשתמש בו לצורך קביעת פרלקסת השמש הוא ארוס (Eros). זמן המחזור שלו הוא 37 שנים. פעם אחת במחזור הוא מתקרב לכדה״א למרחק כ-.0.15 a.u. כך שמתאפשרת מדידת הפרלקסה שלו ברמת דיוק גבוהה, וממנה חישוב פרלקסת השמש ברמת דיוק דומה.

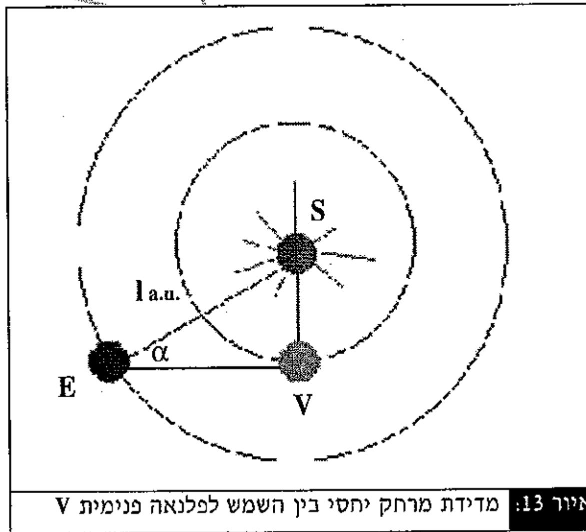


כיום מקובל למדוד את המרחק בין כדה"א לשמש בעזרת מדידת המרחק לכוכב חמה או לנוגה באמצעות טלסקופ רדיו. שולחים מטלסקופ הרדיו אות ומודדים את זמן התנועה של האות מרגע שיצא עד הרגע שנקלט שוב בטלסקופ הרדיו, לאחר שפגע בפלנטה. המרחק יתקבל על-ידי הכפלת משך הזמן במהירות האור וחלוקה בשתיים.

ד. חידת חוקי קפלר

כיצד ניתן היה לנסח את חוקי קפלר בלי לדעת את המרחקים בין הפלנטות לשמש?

אם מדידת המרחק אל השמש דורשת שימוש בחוקי קפלר, כיצד הצליח קפלר בעצמו לנסח את שלושת החוקים המפורסמים? האם ידע את המרחקים בין השמש לבין שאר הפלנטות? האם בכלל הוא היה זקוק לידיעת המרחקים?



איור 13: מדידת מרחק יחסי בין השמש לפלנאה פנימית V

כיום ידוע שפרלקסת השמש היא "8.79. פרלקסות של פלנטות חיצוניות במערכת השמש קטנות מ-'1. קפלר לא היה תצפיתן, ובמחקריו נשען על הנתונים התצפיתיים שקיבל / גנב מטיכו ברהיי (Tycho Brahe). ברהיי ערך את מדידותיו לפני עידן הטלסקופים, ללא שימוש בשום מכשור אופטי. שגיאת המדידה אצל ברהיי הייתה כ-'1, כך שהנתונים הללו לא אפשרו מדידה מדויקת של המרחקים בשיטת הפרלקסה. רק ב-1639 מדד אסטרונום בריטי הורוקס (Horrocks J.) בפעם ראשונה את פרלקסת השמש באמצעות טלסקופ, והערך שקיבל היה והגיעה "14. שיפור של מדידות פרלקסת השמש הושג ב-1677 הודות למאמצים של האלי (Halley) שהשתמש אז בפלנטות פנימיות כוכב חמה (Mercury) ונוגה (Venus). מכאן שלא היו בידי קפלר מרחקים מדויקים של הפלנטות מהשמש, בזמן שניסח ופרסם ב-1619 את שלושת חוקיו. לא היה לו מושג לגבי גודלה האמיתי של מערכת השמש והמרחקים בין הפלנטות. כיצד אם כן הצליח לגלות את החוק השלישי הנשען על היחס בין המרחקים לבין זמני המחזור של הפלנטות, בלי שידע את המרחקים אליהם?

כאשר קופרניקוס (Copernicus) בנה לראשונה את המערכת ההליוצנטרית, הוא גם חישב את המרחקים היחסיים בין פלנטות לבין השמש. לטובת העניין הוא סימן את המרחק בין כדה"א לבין השמש כ-1 (יחידה אסטרונומית) וחילק את כל הפלנטות לשתי קבוצות: פלנטות פנימיות (Mercury ו-Venus) ופלנטות חיצוניות (Mars, Jupiter ו-Saturn). כמו שניתן לראות באיור 13, על מנת למדוד מרחק יחסי בין פלנטה פנימית לבין השמש, היה Copernicus צריך לדעת רק זווית מקסימלית בין הפלנטה לבין השמש, כמו שהיא נראית מפני כדה"א.
לדוגמה, עבור Venus זווית ה-α שווה ל-46°, ומתוך משולש ESV מיד מקבלים:
מרחק VS = (sin α) a.u. = 0.7 a.u

שאלה כיצד ניתן להבטיח שהזווית SVE היא בת 90 מעלות?

במקרה של פלנטות חיצוניות השתמש קופרניקוס בזמני סיבוב של הפלנטות סביב השמש T. נתבונן באיור 13. נניח, שבמשך פרק זמן מסוים t עוברת פלנטה חיצונית דרך AB (או זווית AOB). באותו זמן יעבור כדה"א דרך CD (או זווית COD). שתי הזוויות הללו שוות:

$$\angle AOB = 360^o \text{ x } \frac{t}{T} \qquad \angle COD = 360^o \text{ x } \frac{t}{T_o}$$

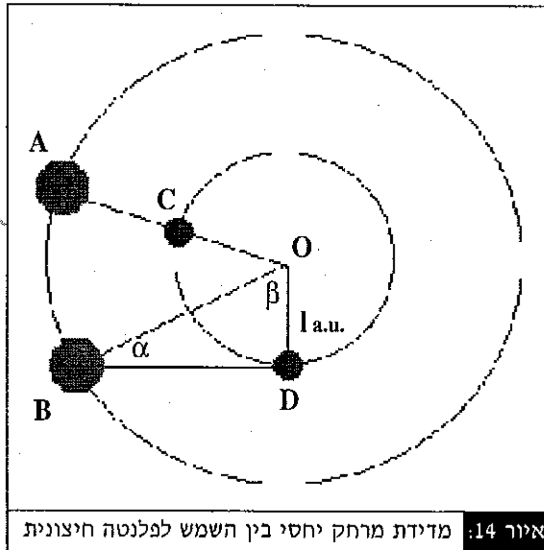
ומכאן:

$$\beta = \angle COD - \angle AOB$$

והמרחק בין הפלנטה לשמש הוא:

$$R = \frac{1}{\cos\beta} \text{ a. u.}$$

בטבלה 3 אנו יכולים להשוות בין הערכות המרחקים של קופרניקוס לבין נתונים שידועים היום ולהתרשם מרמת הדיוק שלו במאה ה- 17.



איור 14: מדידת מרחק יחסי בין השמש לפלנטה חיצונית

מרחק לשמש כיום	מרחק לשמש לפי קופרניקוס	פלנטה
0.387	0.38	Mercury
0.723	0.72	Venus
1.00	1.00	Earth
1.52	1.52	Mars
5.20	5.22	Jupiter
9.54	9.17	Saturn

טבלה 3: השוואה בין מרחקי הפלנטות הידועים כיום ובימיו של קופרניקוס



כמובן, נתונים אלה היו גם בידי קפלר, והוא השתמש בהם במהלך בניית המודל החדש של מערכת השמש. מאוחר יותר, ב-1772, פיתח אסטרונום גרמני **Bode J.E** נוסחה המתארת את שינוי המרחק כפונקציה של סדרת המספרים הכלל של **Bode**:

$$Distance = 0.4 + 0.3 \times 2^{n}, \text{ a. u.}$$

כאשר ערכו של n לכל פלנטה נתון על ידי:

	n
Mercury	$-\infty$
Venus	0
Earth	1
Mars	2
Jupiter	3
Saturn	4

2. שיווי-משקל והפרעות בשמש

א. המשוואה ההידרוסטטית של השמש

לכוכבים בכלל ולשמש בפרט שלבי חיים שונים. עדויות רשומות לגבי גודלה של השמש וצורתה קיימים כבר כמה אלפי שנים ובמהלכן לא נרשם כל שינוי משמעותי בצורת השמש. אם נתעלם לרגע מזריקת המסה ליקום הנוצרת במהלך התפרצויות שמש חזקות בגלל מסתן הנמוכה יחסית לשמש הרי שהחומר של השמש אינו מואץ באופן ניכר, כלומר השמש מצויה במצב של שיווי-משקל.

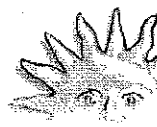
מצב זה של שיווי-משקל קרוי "שיווי-משקל הידרוסטטי". מאחר שתנאי זה שולט גם בגרדיאנט לחצים המצוי בנוזלים וגזים, משוואה זו מסבירה למעשה את המבנה המכני של השמש. הבה נפתח ביטוי מתמטי המסביר לנו את המצב: נניח שמדובר בכוכב שאינו סובב סביב צירו, חסר שדה מגנטי או שכנים קרובים. במצב זה יהיו הכוחות היחידים הפועלים:

א. כוח הגרוויטציה עקב המסה העצמית של הכוכב.

ב. מפל הלחצים של הגז המרכיב את הכוכב ולחץ הקרינה הנפלט מליבתו בעת ייצור האנרגיה.

הידעת?

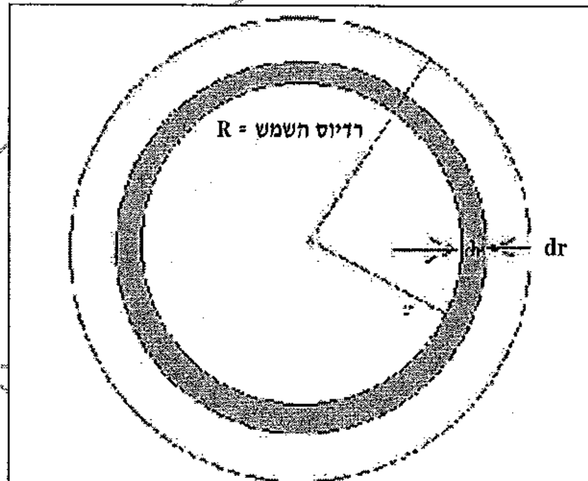
יותר מ-1,000,000 שנה נדרשות לפוטונים שנוצרים בליבת שמש בעת תהליכי ההיתוך הגרעיני להגיע אל פני השמש. העכוב נגרם עקב התנגשויות חוזרות ונשנות בינם לבין היסודות בשמש בדרכם החוצה.



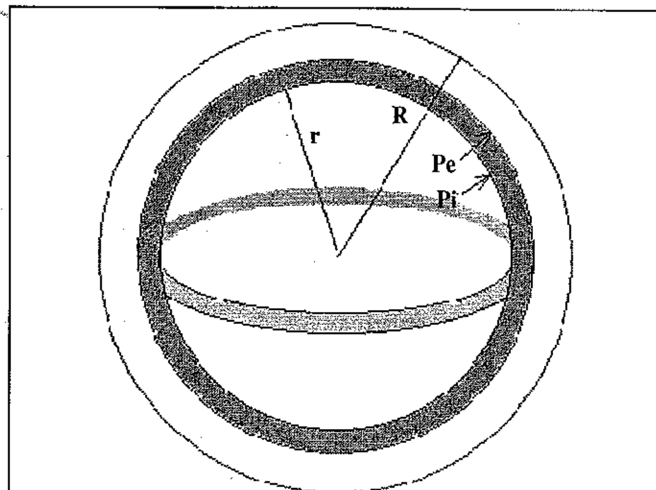
נסמן קליפה כדורית דקה של מסה בעלת רוחב אינפינטסימלי קטן dr ברדיוס r בתוך השמש. עבור יחידת שטח של הקליפה המסה היא dr - pg * dr ומשקל המסה הוא: ???????? משקל זה הוא הכוח הגרוויטציוני הפועל בכיוון המרכז (סימן המינוס).

כדי למנוע מיחידת מסה זו להאיץ כלפי המרכז יש צורך בכוח בעל גודל שווה שיפעל בכיוון מהמרכז החוצה. כלומר, זה מצריך קיום לחץ Pi גבוה יותר על שכבת הגבול הפנימית (הפונה אל מרכז השמש) מאשר הלחץ Pe על שכבת הגבול החיצונית של הקליפה הכדורית. הכוח נטו הפועל על יחידת שטח של הקליפה בהשפעת גרדיאנט הלחץ הזה הוא:

$$Pi - Pe = \frac{dP}{dr}\, dr$$



איור 15: חתך רוחב של השמש שבו מוצגת קליפה דקה בעובי dr במרחק r ממרכז השמש רדיוס הארץ



איור 16: קליפה כדורית ברדיוס r של כוכב בעל רדיוס R > r.
עובי הקליפה הוא dr, והיא מצויה במרחק r ממרכז הכוכב.
מסת הקליפה היא dMr.



הכוח הנובע מהפרשי הלחצים (הלחץ מבפנים מצד אחד והגרוויטציה מצד שני) צריך להתאפס:

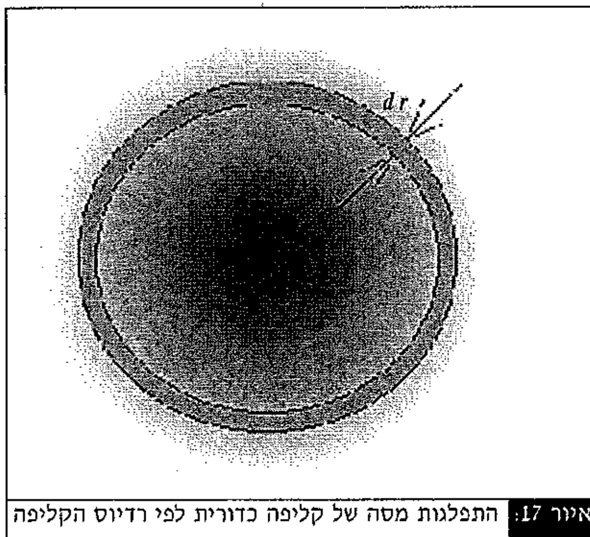
$$\frac{dP}{dr} + g\,P = 0$$

דבר זה נותן לנו את התנאי לשיווי-משקל הידרוסטטי:

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g \qquad (1)$$

$$g = \frac{Gm}{r^2}$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm}{r^2} \cdot \rho$$



איור 17: התפלגות מסה של קליפה כדורית לפי רדיוס הקליפה

זוהי משוואת שיווי-המשקל ההידרוסטטית תלויית רדיוס (גרסת אוילר), ואם נזכור ש- $4\pi r^2$ - שטח פני כדור ברדיוס r

$4\pi \times r^2 \times dr$ - - נפח קליפה כדורית בעלת רדיוס r ועובי dr, נקבל ביטוי המתאר את השתנות המסה כפונקציה של הרדיוס:

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho \qquad (2)$$

$$\frac{dr}{dm} = (4\pi r^2 \rho)^{-1}$$

ונקבל את התיאור תלוי המסה של המשוואה (גרסת לגרנז'):

$$\frac{dP}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \qquad (3)$$

עד כאן חושב הלחץ הנובע מגריויטציית המסה של הכוכב.

בשלב הבא נחשב את הלחצים המתנגדים לו:

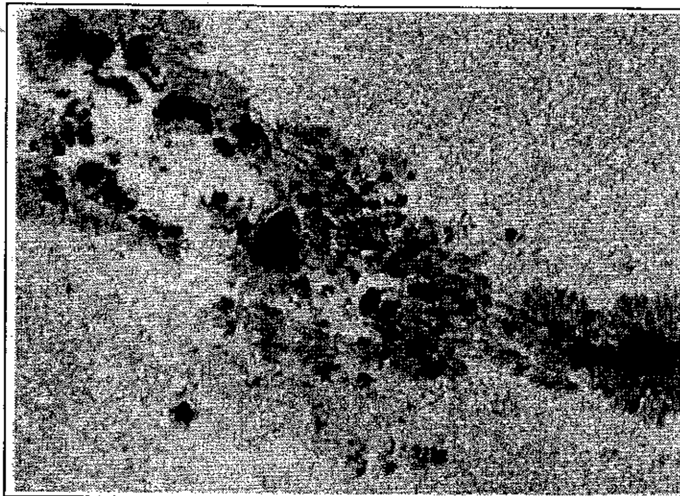
הלחץ המתנגד לכוח הגרוויטציה נובע משני גורמים עיקריים: לחץ הגז המרכיב את השמש ולחץ הקרינה המופנה החוצה עקב זרימת האנרגיה החוצה מליבת הכוכב.



ב. תהליכים מגנטיים בשמש

בדומה לגלילאו, כל מי שמכוון טלסקופ לשמש ומקבל את דמותה, יוכל לגלות נקודות שחורות הנראות כ"לכלוך" על דיסקת השמש. ההרגשה הראשונה תמיד היא שהנקודות אלה הן באמת לכלוך על עדשת הטלסקופ. רק אחרי שמזיזים טלסקופ הלוך ושוב, ניתן להשתכנע שהנקודות נמצאות דווקא על דיסקת השמש, ולא על עדשת הטלסקופ. כך מתגלה ש"גם על השמש יש כתמים". גלילאו היה הראשון שגילה את כתמי השמש. אך במשך כ-300 שנה לא יכלו מדענים לפענח את חידת הכתמים. במאה ה-17 טען הרשל שמקור קרינת השמש הוא עננים בהירים באטמוספרת השמש וכתמים כהים הם רווחים בין העננים שדרכם ניתן לראות את פני השמש. אפילו בתחילת המאה ה-20 עדיין חשבו שכתם שמש הוא מעין מערבולת באטמוספרת השמש. היו מדענים שהגדילו לעשות, הם הצליחו להבחין במרכיב הספירלי של מבנה הכתמים.

רק התפתחות הפיזיקה המודרנית ואנליזה ספקטרלית אפשרו להבין את מהות הכתמים. ראשית, התברר שכתם הוא אזור קר בפוטוספרת השמש: טמפרטורת פני השמש, הפוטוספרה, היא כ-6,000 מעלות, בעוד שטמפרטורת הכתם כ-4,500 מעלות בלבד. שנית, המבנה הפנימי של הכתם התגלה, כאשר בוצעו צילומי שמש בהגדלה גבוהה. כתם בודד מורכב מאזור כהה אחיד, הקרוי צל (**umbra**), ואזור ביניים המקיף את הצל, צל חלקי (**penumbra**) (ראה איור 20).


איור 18: צילום של כתם שמש

ניתוח ספקטרום האור הנפלט מאזור כתם הראה תוצא זימן (**Zeeman**), התפצלות של קווים ספקטרליים בשדה מגנטי. כך התגלה שכתם הוא בעצם אזור, שבו שורר שדה מגנטי חזק. אם עוצמת השדה המגנטי הכללי של השמש שווה ל-**1 Gs**, אז עוצמת השדה המגנטי במרכז הכתם מגיעה ל-**Gs** 3,000 (ראוי לזכור שעוצמה שדה מגנטי ארצי שווה בערך ל-**0.5 Gs**). מהו הקשר בין שדה מגנטי לטמפרטורה הנמוכה באזור הכתם? כיצד שדה מגנטי גורם להיווצרות כתמים? על שאלות אלה נענה בהמשך.

כתמי השמש הם לא התוצאה היחידה של פעילות שדה מגנטי. בעצם, כל התהליכים הפעילים שאנו רואים באטמוספרת השמש בליטות, התלקחויות והתפרצויות, קשתות, סופות רדיו ועוד - נגרמים על-ידי השדה המגנטי של השמש. על מנת להבין כיצד זה קורה, נתייחס קודם להשפעה ההדדית שבין השדה המגנטי לבין פלסמה, זהו מצב צבירה שבו נמצא חומר השמש. כידוע, על חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי פועל כוח לורנץ:

$$\bar{F}_L = q \cdot \bar{v} \times \bar{B}$$

כתוצאה מפעולת כוח לורנץ ינוע החלקיק במסלול מעגלי ולא ימשיך לנוע בתנועה ישרה. מצד שני גם ידוע כי כאשר מזיזים מסגרת שדרכה עובר שטף מגנטי מסוים, השדה המגנטי זז יחד אתה. לפי חוק לורנץ, הפחתת השטף המגנטי יוצרת במסגרת זרם מושרה, ש"משחזר" את השטף הקודם, בתנאי שההתנגדות החשמלית של המסגרת היא קטנה. כזכור, מצב הצבירה של חומר השמש הוא פלסמה, כלומר תערובת של אלקטרונים וגרעיני אטומים (בעיקר גרעיני המימן פרוטונים). בזמן שפלסמה נמצאת בשדה מגנטי, קיימת השפעה הדדית ביניהם.

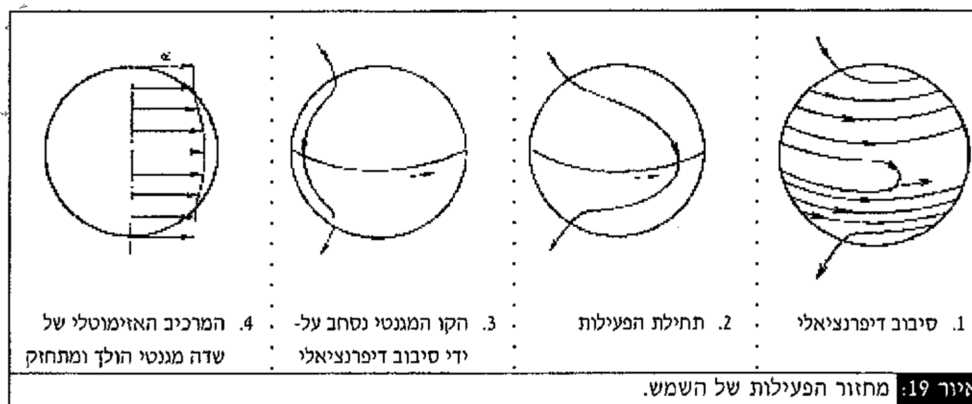
נבחן את ההשפעה ההדדית בעזרת חישוב האנרגיות שלהם.

אנרגיה קינטית של יחידת נפח החומר היא כאשר $E_k = \frac{\rho < v^2 >}{2}$
היא הממוצע של ריבועי מהירויות החלקיקים.

אנרגיה מגנטית ביחידת הנפח של שדה מגנטי $E_m = \frac{B^2}{8\pi}$
(צפיפות האנרגיה) הוא כאשר B - עוצמת שדה מגנטי.
כאשר $\mathbf{E_K}$ של הפלסמה גדול מ-$\mathbf{E_m}$ של השדה המגנטי, אז השדה המגנטי נסחב על-ידי חומר וזז יחד אתו. אולם כאשר $\mathbf{E_m}$ גדול מ-$\mathbf{E_K}$, חלקיקי הפלסמה מסתובבים בתוך השדה ואינם מסוגלים לחדור אותו. ההסבר הפשטני הזה מתאר באופן איכותי בסיס למגוון רחב של תופעות מגנטיות באטמוספרת השמש.

ג. שינויים בשדה המגנטי בשמש

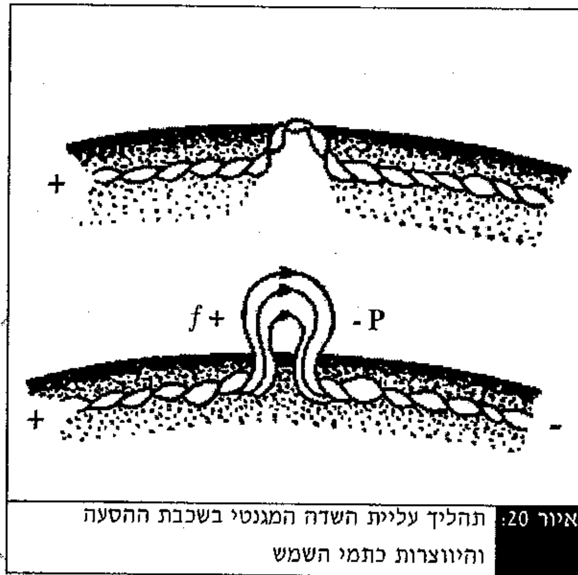
נתבונן עתה בתהליך התפתחות של שדה מגנטי בפני השמש. נקודת המוצא שלנו תהיה אופן הסיבוב של השמש. השמש שלנו היא כדור גז, לכן היא אינה מסתובבת כגוף מוצק. שטחים הנמצאים באזור של קו-המשווה משלימים סיבוב אחד במשך כ-26 ימים, בעוד ששטחים הקרובים לקטבים מבצעים סיבוב שלם במשך כ-73 יום. תופעה זאת נקראת "סיבוב דיפרנציאלי". נתבונן בתחילת התהליך (שלב 2 באיור 21) שדה מגנטי טבול עמוק בתוך השמש (בכמה עשרות אלפי קילומטרים), כאשר $\mathbf{E_m} << \mathbf{E_K}$, ולכן הוא נסחב על-ידי פלסמה. כתוצאה מסיבוב דיפרנציאלי "מלפף" את השדה המגנטי על כדור השמש (שלבים 3-4 באיור 21). אם בתחילת התהליך היה השדה המגנטי מקביל לקו אורך, אזי בשלבים אלו נוצר גם מרכיב המקביל לקווי-הרוחב. כידוע, צפיפות קווי שדה מייצגת את העוצמה של שדה מגנטי, כך שניתן לראות שעוצמת השדה המגנטי הולכת וגדלה.



איור 19: מחזור הפעילות של השמש.

ד. היווצרות כתמי שמש

השמש היא לא כוכב חם במיוחד, - הטמפרטורה על פני הפוטוספרה מגיעה ל-$6,000\ K$. בתנאים אלה שכבות מתחת לפוטוספרה די אטומות, ומעבר אנרגיה בהן נעשה על-ידי הסעת חום. בשכבת ההסעה חומר חם עולה ומושך יחד אתו את השדה המגנטי. כיוון שתנועת החומר היא לא ממש מסודרת, קווי השדה המגנטי מסתבכים בדרך למעלה והופכים ל"צמות" עם עוצמת שדה גבוהה מאוד, עד ל-$3,000\ Gs$ (ראה איור 22). גם הסיבוב הדיפרנציאלי של השמש שמלפף ומותח את הקווים, תורם לתהליך עליית השדה.



איור 20: תהליך עליית השדה המגנטי בשכבת ההסעה והיווצרות כתמי השמש

כאשר שדה מגנטי יוצא מתחת לפוטוספרה, הוא מגיע לאזור של אטמוספרת השמש עם צפיפות חומר נמוכה. באזור הזה היחס בין האנרגיות של השדה ובין הפלסמה מתהפך, והשדה מכתיב לפלסמה את מסלולי התנועה. כמו שנאמר קודם, פלסמה אינה מסוגלת לחדור דרך שדה מגנטי, ולכן באזורים ש"צמה מגנטית" יוצאת החוצה, אין עוד הסעת חום, ונוצרים שטחים קרים יחסית - כתמי השמש.

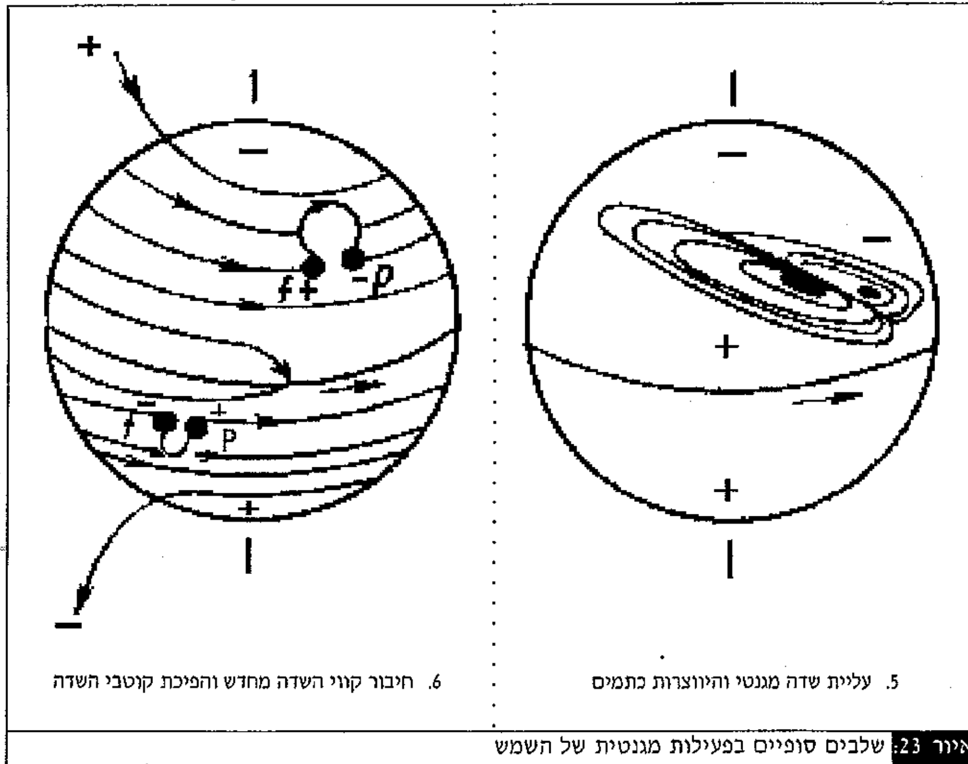
מאיור 22 ניתן ללמוד שכתמים אמורים להיווצר בזוגות ואכן, זה מה שקורה גם במציאות. נציין, שמעבר אנרגיה באזור הכתמים אינו נעצר לגמרי. תנועה לא מסודרת של חומר בתוך שכבת ההסעה מזיזה "שורשים" של לולאה מגנטית ויוצרת גלים המתקדמים לאורך הקווים המגנטיים. זהו סוג מיוחד של גלים המשלבים גם שינויים מחזוריים בשדה מגנטי וגם תנועת פלסמה - גלים MHD (magneto-hydrodynamic waves). גלים אלה מתפשטים לאורך הלולאה כלפי מעלה, וככל שצפיפות החומר הולכת ויורדת, מהירות הגלים גדלה יותר. כאשר מהירות הגלים מגיעה למהירות הקול, הגלים הופכים לגלי הלם ומתפזרים, אך האנרגיה שלהם מחממת את הסביבה. כתוצאה מפעילות MHD קיימת תופעה מיוחדת בסמוך לפני השמש: טמפרטורת החומר שמעל הפוטוספרה קטנה עד ל-$4,500\ K$, אך בשכבות יותר גבוהות (במקום שגלי הלם מתפזרים) הטמפרטורה שוב מתחילה לעלות ומגיעה ל-$100,000\ K$ בכרומוספרת השמש ועד ל-$1,000,000\ K$ בעטרת השמש. בעצם, זה המנגנון שיוצר את הכרומוספרה ואת עטרת השמש.



ה. שלבים אחרונים במחזור הפעילות

ובכן, קווי שדה נמתחים על-ידי סיבוב דיפרנציאלי, מסבכים על-ידי תנועות ההסעה, ובמקומות מסוימים עולים ויוצאים מתוך השמש, וכך נוצרים זוגות הכתמים.

קל להבין שקודם כול התהליך מתבצע בקווי-רוחב גבוהים (40°-50°) וככל שהקווים נמתחים יותר, מתחילים להיווצר כתמים יותר ויותר קרוב לקו-המשווה. כיוון שעדיין קיים שיפוע קטן בין קווי השדה לבין קווי-הרוחב, תמיד יהיה מצב שהכתם האחורי יהיה קרוב יותר לקוטב השדה (במקום שהקו המקורי נכנס אל תוך השמש) מאשר הכתם הקדמי. עם זאת כיווני השדה בכתם האחורי ובקוטב השדה הם מנוגדים. במהלך הזמן נוצר מצב, שבאזור של קוטב השדה מצטבר שדה המנוגד לו. בשלב זה אנו מגיעים לשיא במחזור פעילות השמש. המצב הזה אינו יציב, קווי השדה מתחברים מחדש, כך שכיוון גלובלי של השדה מתהפך, וקווי השדה מתחילים להתפרש תוך כדי אותו הסיבוב הדיפרנציאלי. בסיום התהליך שוב נגיע לשלב המסומן כ-2 באיור 21, אך בהבדל אחד קטן: כיוון השדה המגנטי יהיה הפוך. זהו סוף מחזור הפעילות של השמש, ומכאן הכול מתחיל מהתחלה. משך זמן מחזור של פעילות השמש הוא בערך 22 שנים, כך שכל 11 שנים לערך מתהפך הכיוון של שדה מגנטי בשמש. פרט מעניין נוסף קשור להתחברות קווי שדה מחדש. זהו תהליך מסובך המתרחש בעיקר בזמן התלקחויות השמש, כאשר משתחררת כמות עצומה של אנרגיה מגנטית, והמבנה של השדה המגנטי באזור מתפשט.



5. עליית שדה מגנטי והיווצרות כתמים

6. חיבור קווי השדה מחדש והפיכת קוטבי השדה

איור 23: שלבים סופיים בפעילות מגנטית של השמש

פרק ג': מופעי ירח ושעון ירח



פעילות 5: מופעי ירח

מבוא

"ברור כשמש" הוא ביטוי הבא להבהיר פשטותן של תופעות. בפרק הקודם התברר שנושא השמש אינו ברור כלל ועיקר. נראה כי גם בנושא הירח הדברים אינם פשוטים כפי שהם נראים. תלמידים רבים סבורים שהירח זורח בלילה בלבד. הנחה זו נשענת לעתים על ההיכרות עם התנועה היומית של השמש. חלק מהתלמידים מניחה כי תנועה דומה מבצע הירח בלילה. למעשה, תנועת הירח מורכבת יותר, אם לוקחים בחשבון את שינוי המופעים. כדי להסביר אותם יש צורך לפתח מודל, ובו שלושה שחקנים: השמש, הירח והצופה הנמצא על במה מסתובבת - כדה"א. בפעילות זו ובפעילות הבאה אחריה ננסה לברר את עמדות התלמידים ולאחריהן להציע להם מודל, אשר יסביר את תנועת הירח ואף יאפשר להם לנבא אותה בדרך שיטתית.

הפעילות כוללת ארבעה מרכיבים. אם עומדות לרשותך רק 45 דקות, ניתן לחלקן בדרך הבאה:

1. מה דעתך? - כ-15 דקות.
2. פעילות - כ-10 דקות.
3. סיכום הפעילות - כ-10 דקות.
4. דיון מסכם - כ-10 דקות.

במסגרת זמן זו ניתן רק להתרשם ולערוך היכרות עם המודל בלי להיכנס לשאלות רבות הקשורות למופעי הירח.

מה דעתך?

לאחר הקדמה קצרה יש לבקש מהתלמידים להתייחס לשני החלקים של "מה דעתך?"
בחלק הראשון מתבקשים התלמידים להבהיר מדוע אנו רואים מופעים בירח. השמש, כידוע, נראית תמיד עגולה ואין בה מופעים כלל, בעוד שהירח משנה את מופעיו במחזוריות חודשית. בחלק הראשון מופיעים הסברים שונים שניתנו על-ידי תלמידים, שהתבקשו להסביר את מופעי הירח. טעות נפוצה להסבר מופעי הירח היא בכך שכדה"א מסתיר חלק מירח, ואור השמש אינו מגיע אליו. טעות אחרת קשורה להנחה, שהירח הוא אינו מקור אור, אלא מחזיר אור. בכל מקרה רצוי לאפשר לתלמידים להציג את עמדת הפתיחה, כדי שניתן יהיה לברר אותה במהלך הפעילות.

החלק השני של "מה דעתך?" הוא פעילות פשוטה של ארגון סדר מופעי הירח. ניתן לחלק לתלמידים צילומים של עמוד 43, כך שלא יצטרכו לגזור עמוד מהחוברת. התלמידים מתבקשים להדביק את הצילומים לפי הסדר הנכון. לאחר שהשלימו את הסדר, יש להוסיף שמות למופעים כפי שהם מופיעים בעמוד 45.

בשלב ראשון כל תלמיד עובד לבדו, רצוי עד כמה שאפשר ללא התייעצות עם חבריו הקרובים. בשלב שני מציגים התלמידים את עמדותיהם לחבריהם בקבוצה ובוחנים עמדות שונות משלהם. בשלב שלישי מתקיימים דיון כיתתי, שבו

כל קבוצה מציגה את עמדותיה. המורה יכול לרכז את עמדות התלמידים על הלוח. ניתן לעשות זאת על-ידי רישום סדר המופעים.

סדר התמונות הנכון הוא: ח, ז, א, ה, ט, ו, ג, ד, ב

ניתן גם להציג את הסדר בעזרת טבלה של 3 X 3 המתאימה לדרך שבה על התלמידים להדביק את התמונות.

ח	ז	א
ה	ט	ו
ג	ד	ב

איור 1: הצגת נתוני "מה דעתך?" על לוח הכיתה

יש להדגיש שאין בשלב זה להצביע על הסדר הנכון, אלא לשקף את העמדות השונות שמועלות בכיתה. ההחלטה על הסדר הנכון תינתן רק בזמן הדיון המסכם. לכן סביר בהחלט שעל הלוח יופיעו מספר טבלאות או רצפי תמונות. רצוי לנמק עד כמה שניתן מדוע בחרו התלמידים בסדר זה או אחר ולאחר מכן לגשת מיד לפעילות.

מהלך הפעילות

למרות שפעילות זו היא מודל פשוט ביותר, הרי היא בעלת עוצמה רבה. מרבית התלמידים מופתעים לגלות כיצד פועל חוק ההחזרה לגבי כדור, כאשר מתבוננים בו מנקודות ראות שונות. במקום תאוריות רבות, שבאמצעותן הוסברה התופעה של מופעי הירח עד כה, מאפשר מודל בנוי משלושה גופים ופועל לפי חוקים פיזיקליים פשוטים, לתאר תופעה זו. שלושת הגופים במודל הם:

- השמש - המיוצגת על-ידי מנורה בהספק של 100 וט וניצבת במקום גבוה.
- הירח - המיוצג על-ידי כדור קלקר הנעוץ על שיפוד עץ, המיועד בדרך-כלל לצליית בשר.
- הצופה - המיוצג על-ידי העין של התלמיד. ניתן באנלוגיה להתייחס אל ראש התלמיד כאל כדה"א.

לפני השיעור רצוי לקבוע מנורה בגובה של שני מטרים לפחות. אם הכיתה גדולה דיה, ניתן לקבוע שתיים עד ארבע מנורות המרוחקות זו מזו ארבעה-חמישה מטרים, כך שלא יפריעו זו לזו, כלומר שאורן יפנה לכיוונים שונים. מצב זה ימנע צפיפות סביב מנורה אחת.

צריך להקפיד על כיסוי החלונות, כך שלא יחדור אור מחוץ לכיתה. חדירת האור מבחוץ עלולה להקשות את ראיית החלקים המוצלים. יש לבקש מהתלמידים לעמוד במרחק 2.5-1.5 מטרים מהמנורה ולהחזיק את כדור הקלקר ביד פשוטה עד סופה. על הכדור להיות גבוה מראש התלמיד כדי למנוע הצלה של הכדור על-ידי ראש התלמיד. הדבר יאפשר הבנה נכונה של המודל ויסתור את המחשבה, שמופעי הירח נובעים מצל שמטיל כדה"א על הירח.

בתחילה רצוי שהמורה ידגים לפני הכיתה את התנועה הסיבובית, שיש לבצע עם כדור הקלקר תוך התבוננות בחלק המואר של הכדור. התנועה תהיה בכיוון המנוגד לכיוון תנועת מחוגי השעון. במהלך התנועה רצוי להיעצר כל שמינית סיבוב ולהתבונן בחלק המואר של הכדור. **בדרך** זו יהיה על התלמידים לדווח על גודלו וצורתו של החלק המואר, כפי שהוא נראה להם.

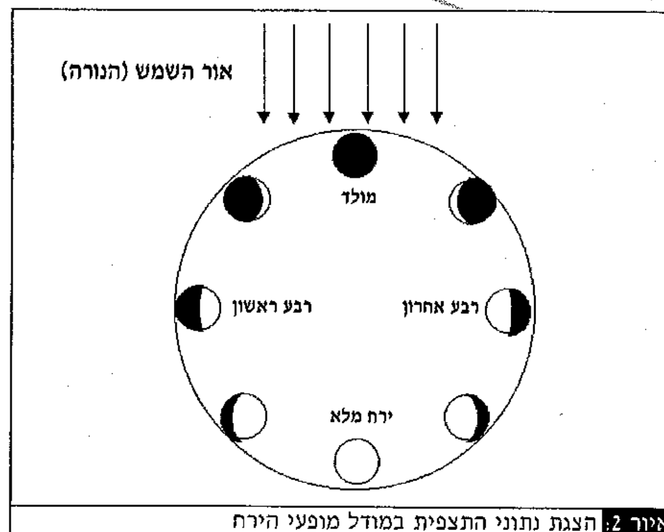
במהלך הפעילות כדור הקלקר מונע מסביב לראשו של התלמיד, מה שמייצג את הקפת הירח מסביב לארץ; על מנת לראות את הירח במהלך הקפתו, התלמיד עוקב במבטו אחרי הירח וגורם בכך לעצמו לנוע סביב צירו. תנועה זו של התלמיד סביב צירו אינה מייצגת במדויק את תנועת כדה״א סביב צירו, שכן כדה״א משלים 29.5 סיבובים סביב צירו במהלך הקפה אחת של הירח מסביבו. עם זה התלמיד חייב להסתובב, אחרת בחלק מזמן ההקפה לא יוכל לראות את הירח. במציאות, צופה ממקום נתון על פני כדה״א אינו יכול לראות את הירח ברציפות 24 שעות ביממה. אפשר לומר אם כן, שבעזרת המודל אנחנו מייצגים **מצבים שונים במהלך החודש הירחי, שבהם סיבוב כדה״א סביב צירו מביא את הצופה לנקודה, שממנה הוא יכול לראות את הירח.**

מתחילים את הקפת ״הירח״ סביב ״כדה״א״, כאשר עומדים עם הפנים לכיוון ״השמש״ (הנורה), וביד מושטת קדימה אוחזים את השיפוד שעליו נעוץ כדור הקלקר. מצב זה מייצג את מולד הירח. כעת מתחילים להניע את כדור הקלקר באיטיות שמאלה, כך שיקיף את הראש. תוך כדי כך שמים לב לכך שהמרווח הזוויתי בין ה״שמש״ ובין ה״ירח״ גדל, ובמקביל משתנה המופע של ה״ירח״: הוא נראה מואר בתחילה מצדו הימני, באופן שהחלק שנראה מואר הולך וגדל.

סיכום הפעילות

למרות שמראה העיניים משכנע למדיי, רצוי לייצג אותו בעזרת איור. הדבר יאפשר להשוות בין ההשערות שהעלינו בשלב ״מה דעתך?״ לבין התוצאות שמציג המודל. מומלץ לסכם פעילות זו בעזרת איור 4 בעמוד 46. באיור נצייר את גודל החלק המואר, או ליתר דיוק נשחיר את החלק המוצל. לעתים התלמידים מתקשים להבין איך לצייר את המופעים. בהנחיות שניתנות נדגיש כי נצייר את מראה הכדור מהצד, כפי שהוא נראה לצופה המתבונן ב״ירח״ (כדור הקלקר):

באיור 2 מוצג כיצד רצוי למלא את דמות הירח בכל שמינית סיבוב.



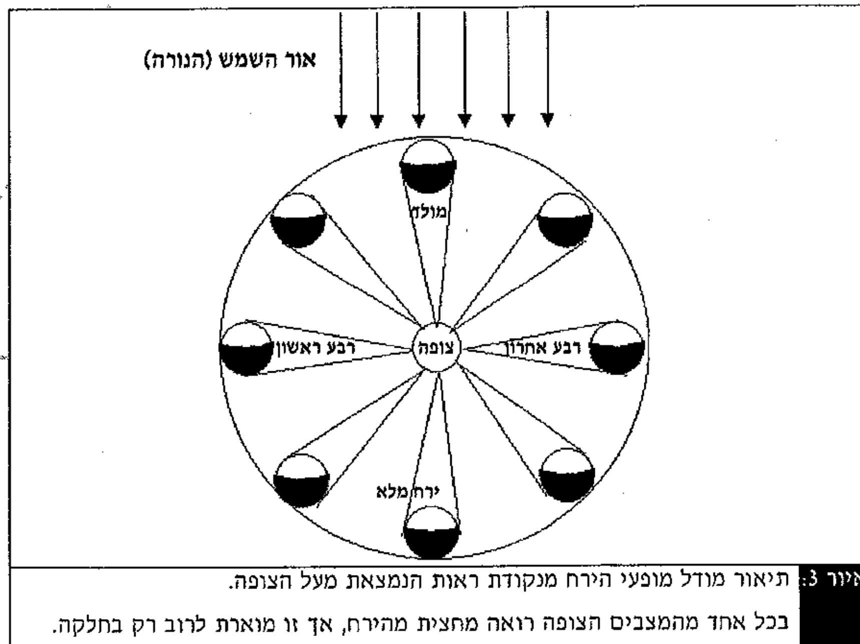
איור 2: הצגת נתוני התצפית במודל מופעי הירח

לפנינו מודל שמאפשר להבין את מופעי הירח בדרך פשוטה הנשענת על מושגי היסוד של האופטיקה: מקור אור, תנאי ראייה, מחזיר אור.

מודל זה מאפשר להבין את המופעים, אך הוא אינו עונה על בעיית הליקויים. כדי להציג מודל זה בדרך המתאימה יותר למציאות ומסדירה את הבלבול הקיים בקרב חלק מהתלמידים בין תופעת הליקויים ובין קיום המופעים של הירח, ניתן לשלב בפעילות מרכיב נוסף: כאשר המרווח הזוויתי הנו 0^0 (מולד הירח), ולחלופין כאשר הוא מגיע ל-180^0, וה"ירח" נראה מלא, אפשר להניע אותו מעלה-מטה כדי לקבל את תופעת הליקויים. במודל שבנינו, יש להציב את "הירח" בתחילת הסיבוב 5 ס"מ מעל גובה העיניים (המייצגים את מישור המילקה) ובמחצית הסיבוב השני יורד "הירח" בהדרגה עד ל-5 ס"מ מתחת למישור זה. (אנו מניחים כי אורך זרוע של תלמידינו, ששווה לרדיוס המסלול של "הירח", הוא כ-60 ס"מ; במעגל כזה קשת שאורכה 5 ס"מ מתאימה לזווית מרכזית של 5^0 בערך). ניתן לראות כי גובה כדור הקלקר ביחס לנורה קובע אם השמש תוסתר מעיני הצופה, מה שמקביל במציאות לליקוי חמה, או אם צלו של כדה"א יוטל על הירח, מה שמייצג ליקוי ירח. כאשר אחד התלמידים מדמה מצב של ליקוי חמה, בן-זוגו יכול לראות את צלו של כדור הקלקר על פניו. הנעת הירח מעלה-מטה מאפשרת לייצג את העובדה, שמישור ההקפה של הירח מסביב לארץ נוטה בחמש מעלות בערך ביחס למישור ההקפה של הארץ סביב השמש (מישור המילקה, או **ecliptic**). כתוצאה מזה הירח בדרך-כלל אינו נמצא במישור המילקה, אלא מעליו או מתחתיו.

דיון מסכם

בדיון המסכם נעמוד על מספר תופעות. ראשית, יש להדגיש כי תמיד מחצית מהירח מוארת, אך בדרך-כלל אין ביכולתנו לראות את כולה. ניתן להדגים זאת בעזרת האיור הבא, המוצג מנקודת הראות של צופה הנמצא מעל התלמיד, בשונה מהאיור הקודם שהוצג מנקודת הראות של התלמיד ובגובה עיניו.



איור 3: תיאור מודל מופעי הירח מנקודת ראות הנמצאת מעל הצופה.
בכל אחד מהמצבים הצופה רואה מחצית מהירח, אך זו מוארת לרוב רק בחלקה.

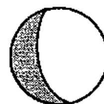
לאחר שהוצגו תוצאות התצפית בדגם ונוצרה הסכמה בין התלמידים, ניתן לבחון עד כמה תוצאות התצפית מהדגם מתאימות לניבויים שהיו בשלב "מה דעתך?". לעתים קשה לתלמידים להבחין בין שלב המילוי לבין שלב החיסור של המופע. לאחר השוואה והסכמה על הסדר הנכון ניתן לתת סימנים לשלב המילוי ולשלב החיסור.
בשלב המילוי לירח יש צורת ((סהר. אם נוסיף לסהר זה קו לכיוון צפון כפי שנראה באיור הבא, ((תתקבל צורה המזכירה את האות ל בכתב-יד העומדת בראש המילה לוהר. סימן אחר הוא שאז לירח יש צורה של האות מ העומדת בראש המילה מאשית. בדרך דומה בשלב החיסור אם נוסיף קו לכיוון צפון, תתקבל האות ג העומדת בראש המילה גווע. לחלופין למופע הירח יש כיוון המזכיר את האות א העומדת בראש המילה אחרית.

הרחבה

במסגרת הדיון המסכם ניתן להתייחס לשאלת הצד האפל של הירח או לשאלה מדוע רואים תמיד אותו הצד של הירח. (שאלה זו עולה בדרך-כלל מצד התלמידים). כדי לשכנע את התלמידים שהדבר נובע מהעובדה שתנועת הירח מסונכרנת, כלומר שזמן ההקפה שלו סביב כדה"א (מנקודת ייחוס של כדה"א) שווה לזמן המחזור של תנועתו הסיבובית סביב צירו, כדאי לשאול אותם קודם אם לדעתם הירח מסתובב סביב צירו. התשובה הצפויה של חלק גדול מהם היא שלילית, כלומר הם סבורים שהירח **אינו** מסתובב סביב צירו. לאחר מכן אפשר לבצע את ההדגמה הבאה: המורה עומד מול עצם כלשהו (כיסא, לדוגמה) ומדגיש את הכיוון הכללי בחדר שאליו מופנים פניו (הלוח, החלון, הדלת, וכו'). בהדגמה זו המורה מייצג את הירח, והעצם מולו הוא עומד מייצג את כדה"א. הוא צועד לאורך רבע סיבוב סביב העצם, כשפניו מופנים לעבר העצם משך כל הזמן. הוא שואל את התלמידים אם לדעתם הסתובב סביב צירו, וייתכן שיהיו תלמידים שיענו בשלילה. אז יש להפנות את תשומת-ליבם לעובדה, שפני המורה פונים בשלב זה לכיוון אחר **בחדר**, ולכן ביצע חלק של סיבוב סביב צירו. כשממשיכים לנוע רבע סיבוב נוסף, קל יותר לראות שגבו של המורה פונה לכיוון שאליו פנו בתחילה פניו, כלומר המורה הסתובב סביב צירו חצי סיבוב, בזמן שהשלים חצי הקפה מסביב לעצם. מכאן שהקפה שלמה תסתיים, כאשר ישלים המורה סיבוב שלם סביב צירו. במילים אחרות - מהעובדה שפני המורה מופנים כל הזמן לעבר העצם שאותו הוא מקיף, נובע שהמורה אכן מסתובב סביב צירו, ושהזמן שדרוש כדי שיבצע סיבוב שלם סביב צירו שווה לזמן, שבו ישלים הקפה שלמה מסביב לעצם.
בנקודה זו המורה צריך להחליט, בהתאם ליכולתם הלימודית של התלמידים ולמידת הסקרנות, שהתעוררה אצלם ביחס לפעילות, אם להסביר את התופעה, כלומר להתייחס לתופעת הגאות והשפל.

תשובות לשאלות בדיון מסכם

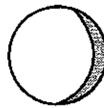
1. יומיים לאחר הרבע הראשון יהיה הירח בשלב התגברות המילוי, והמופע יהיה למעלה ממחצית, האזור המואר נראה בצד ימין.



הרחבה: ניתן לחשב איזה חלק מהירח ייראה מואר, ראה בהמשך סעיף "קצב שינוי המופע".



2. עשרה ימים לאחר הרבע הראשון הירח הוא בן כ- 17 ימים, כלומר יומיים לאחר המילוי, בשלב של תחילת החיסור. צורת הירח תהיה כזו:



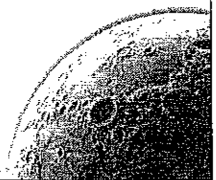
כלומר, יותר ממחצית הצד המואר של הירח מופנה אלינו, כאשר החלק המואר נמצא בצד שמאל.

3. ברבע הראשון הזווית היא 90 מעלות בקירוב (ראה בהמשך איור 6).

4. משך החודש הירחי, כפי שהוא נראה לצופה מהארץ, הוא 29.5 יממות בקירוב. לכן כל רבע נמשך כ-7.5 יממות. זהו אם כן הפרש הזמנים בין הרבע האחרון לבין הירח במלואו. הירח נמצא במופע "הרבע האחרון", התאריך - כ"ב בחודש העברי.

5. במקרה זה ניתן להיעזר באיור המראה את המערכת מנקודת הראות של צופה הנמצא מעל התלמיד. קרני השמש מגיעות בקרוב טוב במקביל לירח ולכדה"א, שכן המרחק בין השמש לארץ גדול בערך פי 375 מהמרחק שבין הארץ לירח. לכן גם הארץ תיראה לצופה העומד על פני הירח במופע הדומה לרבע הראשון.

6. שאלה זו מאפשרת לנו לדון בהבדל בין החודש הירחי לחודש השמשי. הסבר נרחב על כך מופיע בהמשך הפרק. אם התנאי להימלטות הוא שמים ללא ירח או שמים עם ירח במופע חסר, הרי שמדובר בסיום או בראשית החודש הירחי. התצפית מתקיימת ב-14 במאי, ואז הירח נמצא ברבע הראשון. כלומר עד סיום החודש הירחי יעברו עוד כ-23 יום. מכאן שראשית החודש הירחי הבא תהיה ב-7 ביוני. לכן התחום שבו רצוי לאסיר לתכנן את הבריחה יהיה בין 5 לבין 9 ביוני.



פעילות 6: שעון הירח

מבוא

בפעילות זו שהיא פרשנות מעניינת לפעילות הקודמת, אנו קושרים בין שלושה משתנים: מופע הירח, מיקומו בשמים וזמן התצפית. ידיעת שניים מבין שלושת הגורמים מאפשרת לקבוע את הגורם השלישי. רצוי לעסוק בפעילות זאת, אם אינכם נמצאים בלחץ זמן, כי היא מאפשרת העמקה והבנה טובה יותר של תנועת הירח ושל הקשר בינה לבין תנועת השמש וסיבוב כדה״א.

הפרק נחלק לשלושה חלקים. בהנחה שלרשותך 45 דקות ניתן לחלק זאת כך:

״מה דעתך?״ - 10 דקות.

מהלך הפעילות - 25 דקות.

דיון מסכם - 10 דקות

מה דעתך?

בחלק זה של הפעילות אנו מנסים לברר עד כמה מודעים התלמידים לתנועת הירח בשמים. בניגוד לשמש, שתנועתה בשמים משפיעה על הטמפרטורה ועל כמות האור שאנו קולטים במשך היום, הרי תנועת הירח כמעט אינה משפיעה על חיינו, חרף מחאותיהם של הרומנטיקנים שבינינו. לכן חלק מהתלמידים אינו מודע לכך שהירח זורח ושוקע בדומה לשמש. חלקם סבורים שהוא מופיע בלילה בלבד ואינו זורח ביום. בפעילות זו ננסה להתמודד עם תפיסות שגויות אלה ע״י ניתוח שיטתי של תנועתו.

השאלה הראשונה.

במהדורת הניסוי של החוברת לתלמיד חלק מהמלל של השאלה חסר. הנוסח הנכון הנו:

באיור 1 נראה מיקום הירח בתחילת הערב של אמצע חודש אדר תשנ״ט (1.3.99) בשעה 18:44.

היכן יהיה הירח ביחס לאופק כעבור שמונה שעות? נמק את תשובתך.

השאלה הראשונה מנסה לברר עד כמה מודעים התלמידים לקצב התקדמות הירח במהלך הלילה. במפה שלפנינו ניתן לראות את השמים הדרומיים מהמזרח עד המערב בזווית ראייה של 180 מעלות בקירוב. שני גורמים משפיעים על תנועת הירח יחסית לאופק.

א. סיבוב כדה״א.

ב. תנועת הירח סביב כדה״א.

כדה״א מסתובב בקצב של 15^0 בכל שעה ממערב למזרח, לכן תנועת הירח, לו עמד במקומו, הייתה ממזרח למערב בדיוק באותו קצב, והוא היה עובר במשך שמונה שעות מרחק זוויתי של 120^0. אלא שהירח עצמו נע (ביחס לשמש) במהירות זוויתית של 360^0 בכל 29.5 יממות, כלומר בקצב של 12.2^0 ביממה, ממערב למזרח. במשך שמונה שעות הוא



יעבור שליש מהמרחק הזוויתי הזה, כלומר 4.1^0 בקירוב. יש להפחית, אם כן 4.1^0 מהמרחק הזוויתי שעבר הירח עקב סיבוב כדה"א סביב צירו במשך 8 שעות לכן התזוזה הזוויתית הכוללת של הירח תהיה, כ-116^0; זהו תיקון קל יחסית, אך בעל חשיבות רבה כפי שנראה בהמשך.



איור 4: מתאר את פתרון שאלה 1 ב"מה דעתך?"

נדגיש שוב כי פתרון זה לא יוצג בשלב זה על-ידי המורה, אלא ישמש אותו בשלב דיון הסיכום.

השאלה השנייה מציגה ירח ברבע האחרון שלו בשמי הדרום. כפי שנלמד בפעילות זו הירח ברבע האחרון זורח בחצות. לכן אל הדרום הוא יגיע כעבור 6 שעות, כלומר בשעה 6:00 בבוקר. ייתכן שהתלמידים לא יצליחו להעריך את השעה, שבה נראה מופע הירח בשמי הדרום. ניתן לעודד אותם לנחש, אך לא להציע להם את התשובה.

לאחר שכל תלמיד ענה את תשובותיו, יתקיים דיון קבוצתי קצר, ובעקבותיו דיון במליאה. תפקיד המורה הוא אך ורק לסכם את עמדות התלמידים וצרף מושגים חדשים במידת הצורך, כגון מהירות זוויתית.

מהלך הפעילות

פעילות זו מבוססת על ניתוח של איור 3. הגילוי בפעילות זו הוא הקשר השיטתי בין שלושת הגורמים: מופע, מיקום בשמים וזמן. כאן נודעת חשיבות רבה לתנועת הירח סביב כדה"א. כפי שנוכחנו בהקדמה במשך יממה, הירח נע 12.2 מעלות, שהן 45 דקות. כלומר כל יממה הירח זורח באיחור של כשלושת-רבעי השעה.

במהלך הפעילות התלמידים צריכים לנתח ארבעה מופעי ירח: מולד, רבע ראשון, מילוי, רבע אחרון. המפתח ליצירת הקשר בין שלושת הגורמים הוא השינוי בשעת הזריחה. מניתוח איור 3 ניתן להבין שהירח זורח במולד החודש בשעה 06:00 לערך. במהלך הלילה תנועתו הנראית מושפעת בעיקר מסיבוב כדה"א. לכן בכל 6 שעות הוא חולף על פני 90 מעלות בקירוב. מכאן שבשעה 12:00 בצהריים הירח בזמן המולד נמצא בכיוון דרום, בדומה לכיוון השמש, ובשעת הערב הוא יימצא במערב בסמוך לכיוון השמש.

כל יממה הירח זורח באיחור של 45 לערך. לכן ברבע הראשון לאחר 7.5 יממות הירח זורח באיחור של 6 שעות בהשוואה למולד. כלומר זריחת הירח תהיה בשעה 12:00 בצהריים. בדרך דומה ניתן להעריך שזריחת הירח במילוי תהיה בשעה 18:00, וברבע האחרון יזרח הירח בחצות הלילה. כאשר רעיון זה מובן, קל למלא את הטבלאות שבפעילות.

נציג כאן את מילוי שני הטורים הראשונים של טבלה 3, נוספה עמודה של צורת המופע.

שם המופע	צורת המופע	שעת זריחה
מולד	●	6:00
רבע ראשון	◐	12:00
מילוי	○	18:00
רבע אחרון	◑	24:00

טבלה 1: תיאור הקשר בין מופע הירח ובין שעת הזריחה

ניתן לעדן טבלה זו על-ידי הוספה של מצבי ביניים של 8/1 ,8/3, 8/5 ו- 8/7 של חודש.

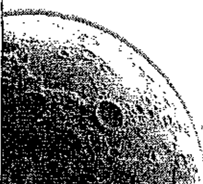
דיון מסכם

הדיון המסכם יכול להתקיים בשני כיוונים:

א. הצגת טבלה 3 המלאה על הלוח. רצוי שאחת הקבוצות תוזמן להציג את הטבלה, כפי שהיא מוצאת לנכון למלאה. לאחר שהקבוצה תציג את עמדתה ותסביר את נימוקיה, ניתן יהיה לקבל תגובות של קבוצות אחרות. בדרך זו ניתן להבהיר נקודות בלתי ברורות. הרחבה על שעון הירח ותנועת הירח ביחס לתנועת השמש מופיעה בהמשך.

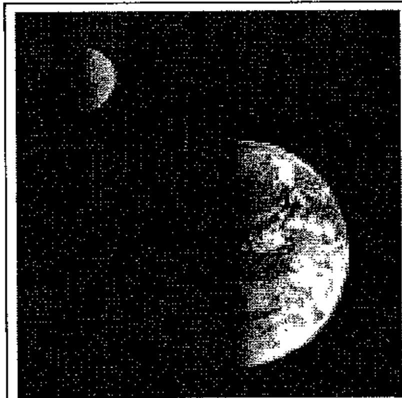
ב. ניתוח של מקרים פרטיים של מצבי הירח בשמים, כפי שהם מופיעים בשאלות הסיכום.

חשוב לבקש מהתלמידים לעקוב במשך השבוע שבין המפגש הנוכחי למפגש הבא אחרי מופעי הירח ולבחון אם התאוריה פועלת הלכה למעשה. זוהי הזדמנות נעימה להיווכח שאכן יש קשר הדוק בין מודלים המפותחים בכיתה לבין תנועות בשמים.



במהלך תנועתו של הירח מסביב לכדה"א, הזווית שנוצרת בין השמש, כדה"א והירח משתנה. כתוצאה מכך, תוך כדי שינוי המופע של הירח משתנה **מיקומו** בשמים **יחסית לשמש**. מכיוון שמיקום השמש בשמים קובע את השעה, **יוצא** שאפשר לקבוע (בערך) מהי השעה גם לפי מופע הירח ומיקומו בשמים.

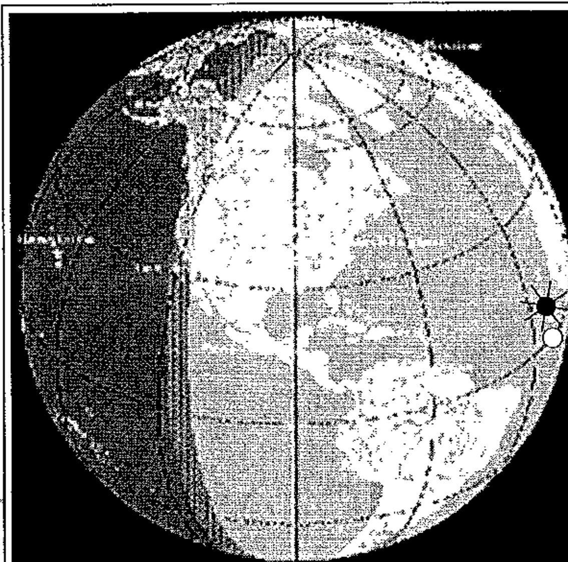
על מנת להדגים את הקשר בין מופע הירח, המרווח הזוויתי שבינו ובין השמש ושינוי מיקומו של הירח בשמים כתלוי בזמן, נבחן מספר מצבים **לאורך** מחזור אחד של מופעי הירח, כפי שהדבר נראה מנקודה מסוימת על פני כדה"א (וושינגטון).



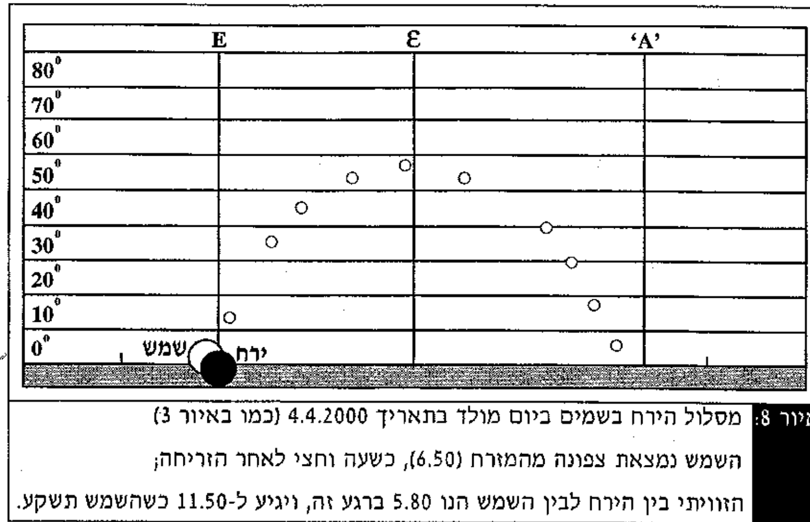
איור 6: כדה"א והירח כפי שצולמו מהחללית גלילאו שני הגופים מוארים על ידי השמש; מהזווית שבה צולמו, ניתן לראות רק חלק מצדם המואר.

מולד

הירח והשמש נמצאים על אותו קו שעה, כלומר נעים בשמים ביחד. (במקרה שגם הקואורדינטה השמימית השנייה עליה הם נמצאים זהה, יוצר ליקוי חמה; למעשה, ליקוי חמה יכול להיות רק בראשית החודש הירחי.) הירח זורח כשהשמש זורחת, נראה קרוב אליה בשמים במשך כל שעות היום ושוקע כשהשמש שוקעת.



איור 7: **מולד הירח** - הירח נמצא על קו השעה שבו נמצאת השמש. בשעה 09:28 בוושינגטון (בערך שעתיים וחצי לאחר זריחת השמש) הירח והשמש קרובים לאופק מזרח, והם ינועו יחד בשמים לכיוון מערב במשך כל היום.



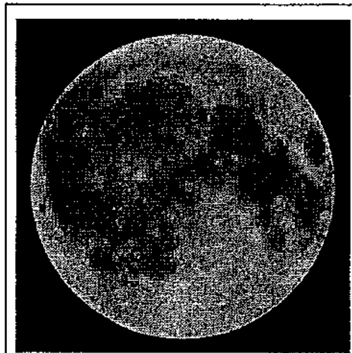
איור 8: מסלול הירח בשמים ביום מולד בתאריך 4.4.2000 (כמו באיור 3)
השמש נמצאת צפונה מהמזרח (6.50), כשעה וחצי לאחר הזריחה;
הזוויתי בין הירח לבין השמש הנו 5.80 ברגע זה, ויגיע ל-11.50 כשהשמש תשקע.

האם ניתן לראות את הירח במולדו?

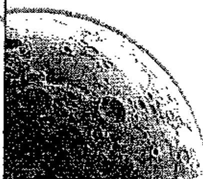
עקב תנועתו הבלתי פוסקת של הירח מסביב לכדה"א מחד גיסא, ותנועתה הרצופה של הארץ סביב השמש מאידך גיסא - מופע הירח משתנה **ברציפות**. ביום המולד, כאשר מופע הירח משתנה בין 0% ל-1% בקירוב, המרווח הזוויתי בין השמש לירח משתנה בין 0^0 ל-12.2^0 (360/29.5=12.2). מרווח זה שקול ל-0.81 שעה או 48 דקות (12.2/15=0.81). כלומר: ביום הראשון של החודש הירחי הפרש הזמן בין שקיעת השמש לשקיעת הירח יכול להיות 48 דקות לכל היותר. עד שקיעת השמש הירח נמצא בשמים יחד עם השמש; מאחר שבהירותו ביום זה נמוכה, נוכל להבחין בו רק לאחר שקיעת השמש.

סיבוב כדה"א סביב צירו מכתיב את התשובה לשאלה, אם מנקודה מסוימת על פני כדה"א ניתן לראות את מולד הירח. במילים אחרות: כאשר השמש נראית שוקעת ביום המולד, ככל שהמרווח הזוויתי בינה לבין הירח קטן, הפרש הזמנים בין שקיעת הירח לשקיעת השמש קטן הזמן שעומד לרשותנו לצפות בירח קצר יותר, ואחוז קטן יותר של החלק המואר של הירח פונה לעבר כדה"א.

אם לדוגמה, בנקודה שבה נמצא הצופה שורר לילה, כאשר מופע הירח הנו אפס, תחלוף יותר מחצי יממה עד השקיעה הבאה של השמש. זה יאפשר למרווח הזוויתי שבין הירח לבין השמש לגדול (עד 12.20 לכל היותר), הירח "יישאר בשמים" זמן ארוך יותר לאחר שקיעת השמש (48 דקות לכל היותר), ומופע הירח יהיה גדול יותר (עד 1% לכל היותר) (ראה איור 5).



איור 9: **מולד הירח** - גיל הירח 16 שעות (0.75 יום). המרווח הזוויתי בינו לבין השמש בערך 90.



תחילת המילוי (עד הרבע הראשון)

הירח מתחיל "להתרחק" מהשמש - הוא נראה נע לכיוון מזרח ביחס אליה.
המרווח הזוויתי בין הירח לשמש גדל מדי יום ב-12.2°; לכן אפשר לראות אותו אחרי המולד סמוך לאופק מערב, לאחר שקיעת השמש.
לאחר 7.3 ימים בערך המרווח הזוויתי בין הירח לשמש מגיע ל-90°. למעשה זהו גודלה של הזווית שנוצרת בין שלושת הגופים שמש ארץ ירח, שבקדקודה נמצאת הארץ (ראה איורים 10 ו-11). זהו המצב שבו חצי מצדו המואר של הירח (החצי הימני) פונה לכדה"א; מצב זה הנו **הרבע הראשון**.

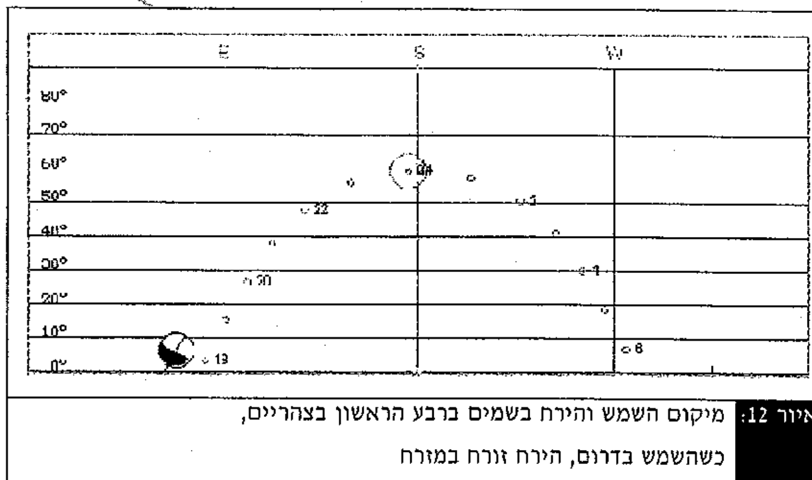
כאשר מתרגמים הפרש זוויתי זה להפרש זמנים, מתקבל מרווח זמנים של שש שעות. פירוש הדבר: הירח זורח (ראה איורים 10 ו-12) שש שעות אחרי זריחת השמש (~ 12 בצהרים), נמצא ברום השמים כאשר השמש שוקעת (~ 18:00, תלוי בקו-הרוחב ובעונה) ושוקע בחצות.



איור 10: המרווח הזוויתי בין הירח ובין השמש ברבע הראשון המרווח בין קווי-אורך סמוכים 300; מכאן שהמרווח הזוויתי בין השמש לירח - 900. באירופה לילה; הירח אשר נע יחד עם הקו המפריד בין יום ללילה בשלב זה של החודש הירחי, כבר שקע; בארצות-הברית הוא נראה מעל האופק המזרחי (צופה בוושינגטון ראה אותו זורח לפני כשעתיים).



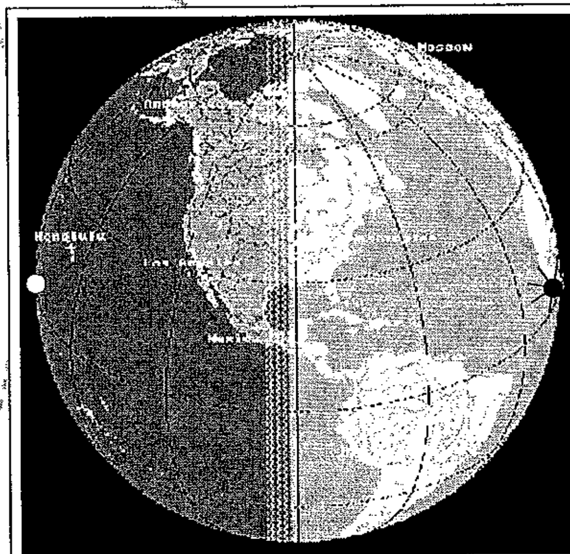
איור 11: כיוון הירח ביחס לכיוון השמש ברבע הראשון בחלק הימני:
חציו הימני של צד הירח הפונה אל כדה״א נראה מואר;
בחלק השמאלי: הירח נראה בזווית 90^0 משמאל לשמש.



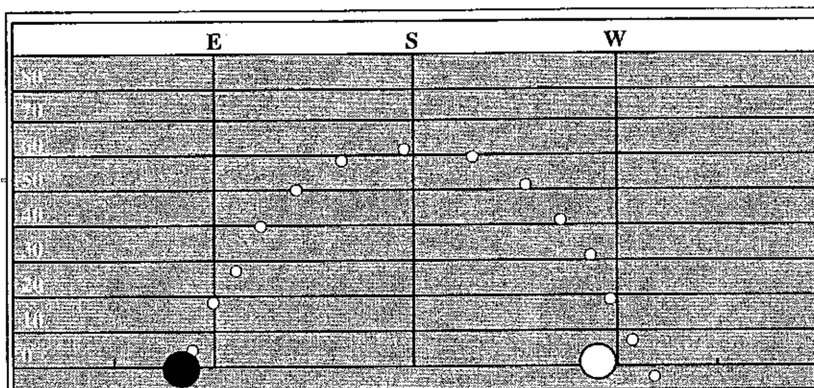
איור 12: מיקום השמש והירח בשמים ברבע הראשון בצהריים,
כשהשמש בדרום, הירח זורח במזרח

ירח מלא

התגברות המילוי נמשכת כ-7.3 ימים נוספים. 14.5 ימים בערך לאחר המולד המרווח הזוויתי בין הירח ובין השמש מגיע ל-180^0. מרווח זוויתי זה שקול להפרש זמנים של 12 שעות, כלומר: הירח זורח עם שקיעת השמש (~ 18:00, תלוי בקו-הרוחב ובעונה), נמצא ברום השמים בחצות ושוקע בבוקר, כשהשמש זורחת (~ 06:00, תלוי בקו-הרוחב ובעונה). (ראה איור 13 ואיור 14).



איור 13: שקיעה של ירח מלא עבור צופה שנמצא בוושינגטון, הירח נמצא ליד אופק מערב ועומד לשקוע, כאשר השמש באופק מזרח (בוקר).

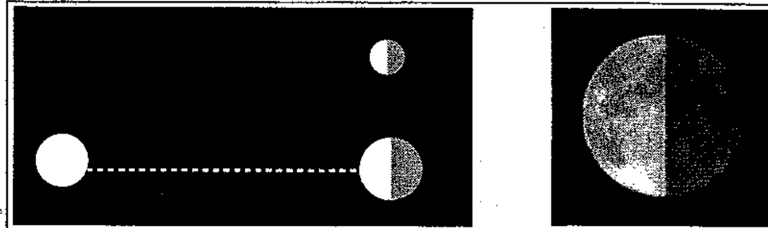


איור 14: הירח המלא שוקע כשהשמש זורחת (בבוקר)

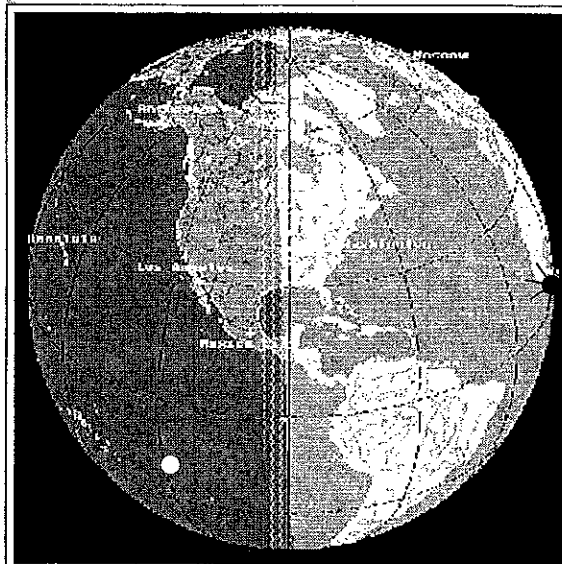
תחילת החיסור והרבע האחרון

עם תחילת החיסור גדל המרווח הזוויתי שבין הירח לשמש. זריחת הירח, שכרגיל מתאחרת ב-48.8 דקות (תזוזה זוויתית של 12.2^0 שקולה לתזוזה בזמן של 12.2/15=0.813 שעות או 48.8 דקות), עוברת בהדרגה משעות הערב לשעות הלילה. באופן דומה, שקיעת הירח עוברת בהדרגה משעות הבוקר לשעות הצהריים. בשלב זה של החודש העברי ניתן לראות את הירח בשמים בחלק (משתנה) משעות היום!

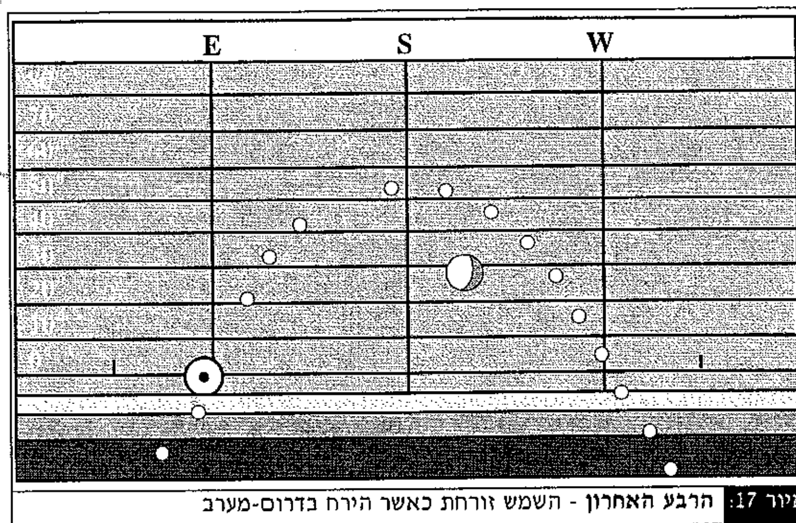
בערך 7.3 ימים אחרי ליל הירח המלא הזווית מגיעה ל-270^0 (ראה איור 15); כלומר הירח נראה בכיוון ניצב לכיוון שבו נראית השמש, הפעם ממערב לה. המופע הנו **הרבע האחרון** - חציו השמאלי של צד הירח הפונה לכדה"א מואר. מבחינת צופה מכדה"א, הירח כעת מקדים את השמש בשש שעות (**$90^0 : 15^0$/hour**), כלומר: זורח בחצות, נמצא ברום השמים בזמן שהשמש זורחת 06:00 בבוקר (משתנה עם קו-הרוחב והעונה), ושוקע בצהריים.



איור 15: **הרבע האחרון** - בחלק הימני: חציו השמאלי של חלק הירח הפונה אל כדה"א נראה מואר; בחלק השמאלי: הירח נראה בזווית 900 מימין לשמש. הערה: הגדלים והמרחקים היחסיים באיור אינם תואמים את המציאות.



איור 16: **הרבע האחרון**
עבור צופה שנמצא בוושינגטון, הירח נראה בכיוון דרום-מערב, כאשר השמש באופק מזרח (בוקר).



איור 17: הרבע האחרון - השמש זורחת כאשר הירח בדרום-מערב

התגברות החיסור

המרווח הזוויתי בין הירח ובין השמש הולך ומצטמצם (12.2° ביום), במילים אחרות הפרש הזמנים בין זריחת הירח לזריחת השמש (או בין שקיעת הירח לשקיעת השמש) קטן מידי יום. זריחת הירח מתאחרת ב-48 דקות כל יום, כך שבלילות הללו הירח אינו נראה בשמים, הוא מופיע רק לפנות בוקר; לעומת זאת הוא נמצא בשמים במשך מרבית שעות היום. בתום 29 ימים מהמולד הקודם של הירח המרווח בין הירח ובין השמש נסגר, ושוב פונה צדו המואר של הירח מכדה״א והלאה.

2. מופע הירח כשעון

מופע הירח משתנה בהתאם לתאריך (לפי החודש הירחי), ומיקומו בשמים בכל אחד מימי החודש הירחי תלוי בשעה. ניתן לבנות לפי קשר זה בין מיקום הירח, המופע שלו והשעה שעון ירח. בטבלה 2 נמצאים נתוני המיקום והשעה של הירח כתלות במופע, עבור ארבעה מופעים. החל מיום המולד, שעת הזריחה של הירח מתאחרת, כאמור, מדי יום ב-48.8 דקות, כך שעל פני רבע חודש ירחי האיחור מצטבר לשש שעות.

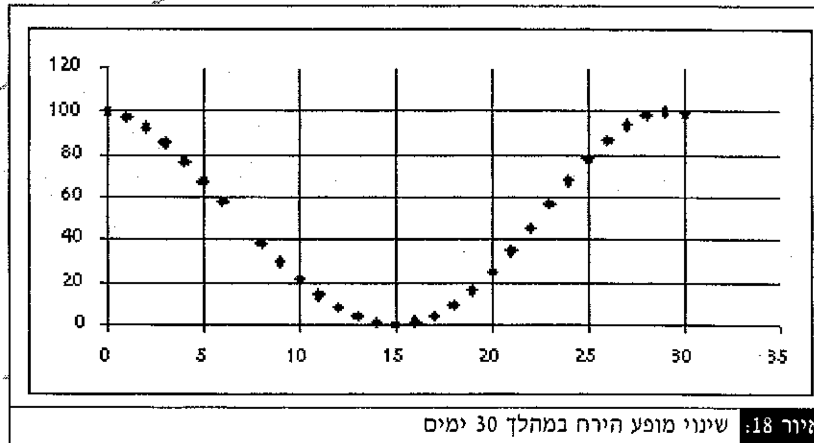
מופע הירח	השעה שבה הירח נמצא במערב	השעה שבה הירח נמצא בדרום	השעה שבה הירח נמצא במזרח
מולד	06:00	12:00	18:00
רבע ראשון	12:00	18:00	24:00
ירח מלא	18:00	24:00	06:00
רבע אחרון	24:00	06:00	12:00

טבלה 2: הקשר בין מיקום הירח, המופע והשעה

ניתן אם כן להשתמש בירח כבשעון, אם מזהים את המופע שלו ואת מיקומו בשמים.

3. קצב שינוי המופע

בעוד שמיקום הירח בשמים ביחס לשמש משתנה מדי יום בקצב קבוע (12.2^0 ביום), שינוי המופע של הירח מדי יום אינו קבוע; באיור 18 מתואר מופע הירח (באחוזים) במשך 30 ימים במהלך חודשים ינואר פברואר 2000, בשעה קבועה (15:30 ישראל).
ניתן לראות שהמופע משתנה לפי פונקציה הרמונית (**sinus** או **cosinus**).



איור 18: שינוי מופע הירח במהלך 30 ימים

את החלק (באחוזים) של הצד המואר של הירח, תלוי בזמן שחלף מהמולד, נוכל לקבל מתוך איור 18. עלינו לזכור שפני הירח במציאות הינם כדוריים, אבל אנו רואים היטל הדו-ממדי שלהם עיגול. כאשר חולפים **t** ימים מהמולד, המרווח הזוויתי בין השמש לבין הירח יהיה:

$$\alpha = \omega t$$

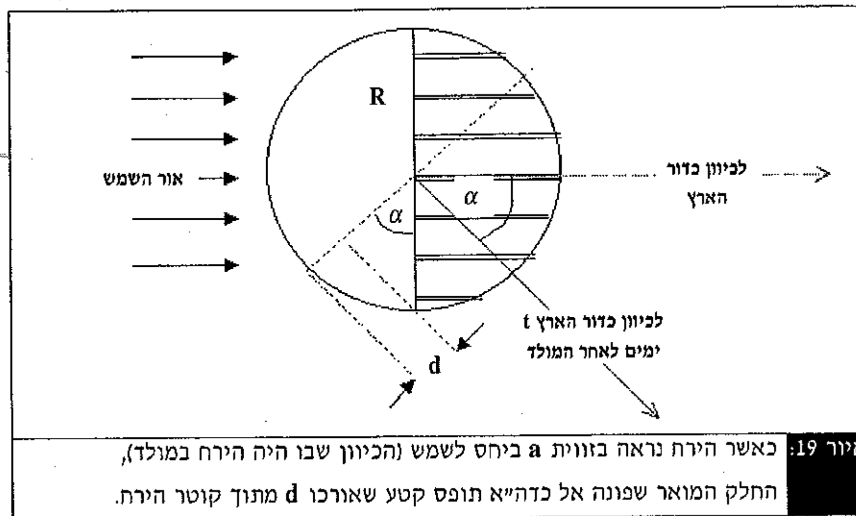
כאשר: ω - קצב גידול המרווח הזוויתי בין השמש ובין הירח, כלומר 12.2 מעלות ליום בקירוב.
α - הזווית שבין הירח לשמש ($\alpha = 0$ במולד).

רוחבו של החלק המואר (**d**) מתוך היטל זה יחסית לקוטר הירח יהיה אז:

$$d = \frac{R(1-\cos\alpha)}{2R} = \frac{1}{2}(1-\cos\alpha)$$

כאשר **R** - רדיוס הירח.





איור 19: כאשר הירח נראה בזווית a ביחס לשמש (הכיוון שבו היה הירח במולד), החלק המואר שפונה אל כדה"א תופס קטע שאורכו d מתוך קוטר הירח.

כאשר מציינים, לדוגמה, שמופע הירח הינו 75%, הכוונה היא ש-**d** מהווה 75% מקוטר הירח.
כדאי לשים לב לעובדה, שגודל השטח המואר שרואים מכדה"א ביחס לשטח העיגול המלא, אינו שווה למופע באחוזים.

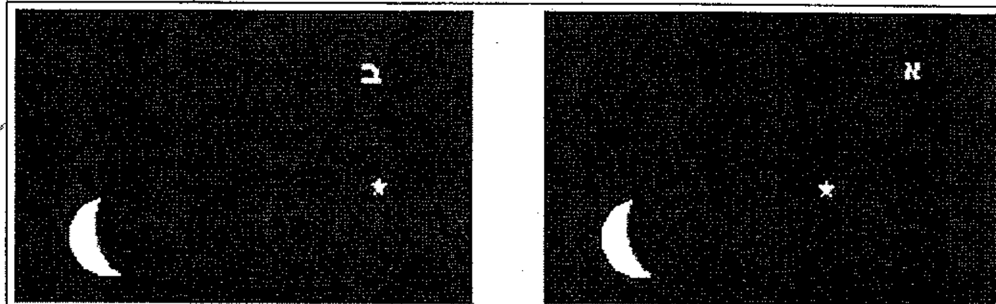
4. נקודת מבט כוכבית

כאשר בודקים את מיקום השמש ביחס לכוכבים, מגלים כי במהלך כמה ימין מיקומה של השמש בשעה נתונה משתנה. השמש זזה ביחס לכוכבים לכיוון מזרח.
אם ניקח בחשבון את תנועת השמש ביחס לכוכבים, זמן המחזור של הירח ביחס לכוכבי הרקע יהיה שונה מזמן המחזור שלו ביחס לשמש; על כל נרחיב בסעיף "חודש סינודי וחודש סידריאלי".

5. חודש כוכבי וחודש שמשי

ביחס לכוכבים, הירח משלים הקפה אחת מסביב לכדה"א (360^0) במשך 27.3 יממות; משך זמן זה נקרא חודש **סידריאלי (כוכבי)**.

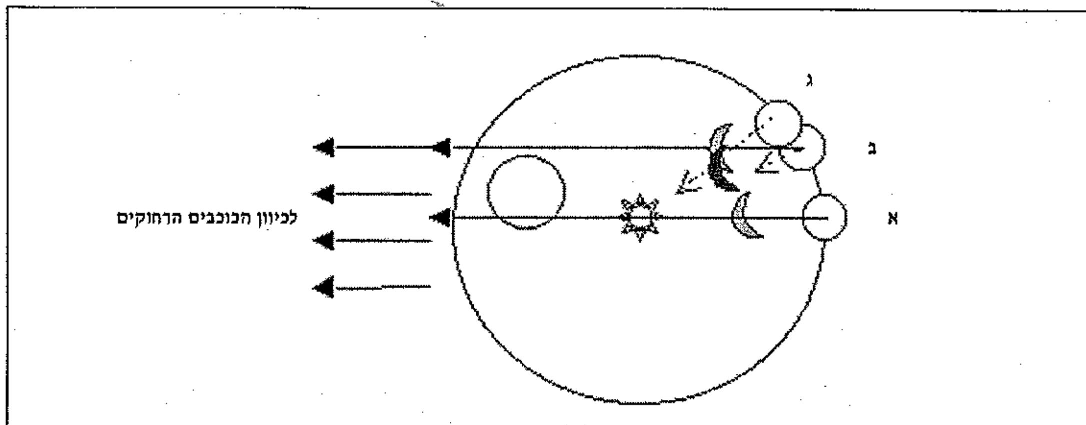
תנועת הירח ביחס לכוכבים דומה לזו של השמש. המגמה הכללית של תנועת הירח ביחס לכוכבים היא מזרחה. קצב התנועה משתנה במהלך החודש. הקצב הממוצע הנו בערך קוטר ירח אחד בשעה, או כ-13.2^0 ביום. כאשר הירח נמצא ליד כוכב בהיר, ניתן לגלות תנועה זו תוך שעה בערך, בצורה שמתוארת באיור 20.



איור 20: תנועת הירח ביחס לכוכבים בחלק א של התמונה נראה הירח בקרבת כוכב בהיר; בחלק ב, שעה אחת מאוחר יותר, הירח נע מזרחה יחסית לכוכב; מידת התזוזה שווה לקוטר הירח. תנועה זו נוספת לתנועה הכללית מערבה של הירח והכוכב (ושל כל העצמים הנראים בשמים)

כאשר יחלפו כ-27.3 ימים (360:13.2 ~), יחזור הירח לאותו המקום ביחס לכוכבים.

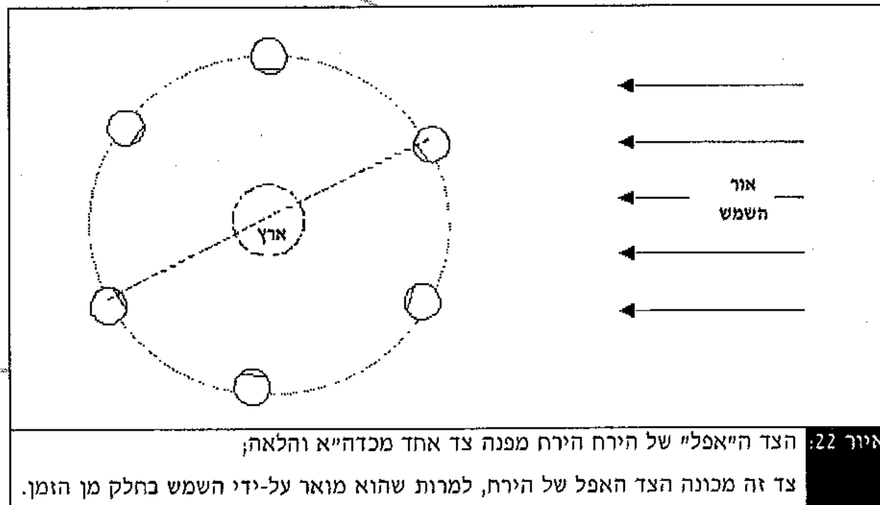
התנועה של הארץ מסביב לשמש גורמת לכך שפרק-הזמן שנמשך **מחזור אחד של מופעי הירח** ארוך יותר מהחודש הסידריאלי, והוא שווה ל-29.5 יממות (ראה איור 21). משך זמן זה נקרא החודש **הסינודי (ירחי)**.



איור 21: התנועה הנראית של הירח ביחס לשמש וביחס לכוכבים: הזמן שחולף בין שני מצבים עוקבים של הירח ביחס לכוכבים (התכלת והכתום) הנו חודש סידריאלי (27.3 ימים); במשך זמן זה כדה"א נע במסלולו סביב השמש (מנקודה א לנקודה ב), כך שהשמש נראית מנקודה זו בכיוון שונה (החץ המקוקו). כאשר יחלפו בערך יומיים נוספים, יושלם חודש סינודי - הארץ תגיע לנקודה ג, ומצב הירח ביחס לשמש יהיה זהה למצב ב-א (מולד).

6. הצד ה"אפל" של הירח

צופה שנמצא על כדה"א רואה צד אחד (למעשה, כפי שיוסבר בהמשך, כ-60%) של פני הירח. זהו הצד שהירח מפנה כל הזמן לעבר כדה"א (ראה איור 22). הצד האחר של הירח אינו נגלה לעיניו של הצופה מכדה"א. נהוג לכנות צד זה של הירח בשם "הצד האפל של הירח", מכיוון שבני-האדם לא ראו אותו עד 1959, כאשר צולם על-ידי החללית הסובייטית לונה 3 (Luna 3).



איור 22: הצד ה"אפל" של הירח הירח מפנה צד אחד מכדה"א והלאה;
צד זה מכונה הצד האפל של הירח, למרות שהוא מואר על-ידי השמש בחלק מן הזמן.

הצד האפל לעתים מואר

אור השמש מאיר כל הזמן **מחצית** מפניו של הירח. בהסבר המופעים של הירח צוין כי המופעים נוצרים מפני שחלק שונה מתוך הצד המואר של הירח מופנה כלפי כדה"א משך בכל יום במהלך החודש. אפשר לומר גם שבכל יום חלק שונה של הצד הפונה אל כדה"א, מואר על-ידי השמש. באותה המידה נכון לומר שבכל יום חלק שונה של הצד שאינו פונה אל כדה"א, "הצד האפל", מואר על-ידי השמש. כלומר - צדו ה"אפל" של הירח מואר על-ידי השמש באותה המידה כמו יתר האזורים של פני הירח.

סיבוב הירח מסונכרן

העובדה שהירח מפנה צד אחד בלבד לכיוון כדה"א נובעת מכך שסיבוב הירח סביב כדה"א וסביב צירו מסונכרנים, כלומר: זמן המחזור של סיבוב הירח סביב צירו שווה לזמן ההקפה של הירח את כדה"א (29.5 ימים). בסעיף "הערות דידקטיות" המלצנו על דרך להציג רעיון זה בפני התלמידים. סיבוב הירח סביב צירו היה מהיר יותר בעבר הרחוק, והוא הואט עד אשר זמני המחזור של תנועת הירח סביב צירו וסביב כדה"א השתוו. תהליך ההאטה קשור לתופעת הגאות והשפל.

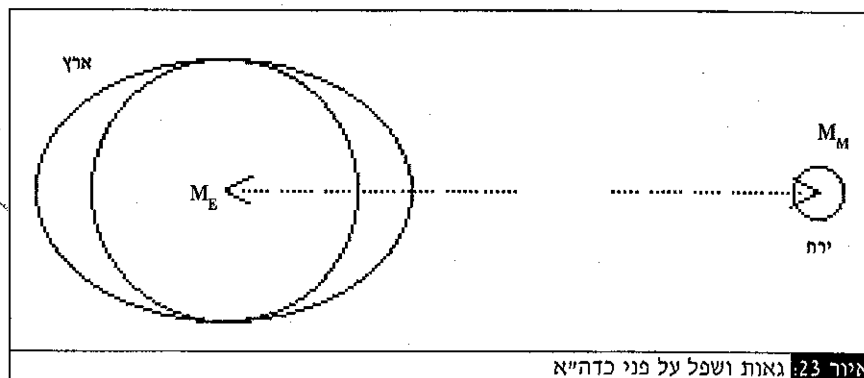


גאות ושפל

ניוטון הסביר את תופעת הגאות והשפל על פני כדה״א בעזרת האינטראקציה הגרוויטציונית שבין הירח לבין כדה״א. האופי הסימטרי של האינטראקציה הגרוויטציונית גורם לכך שתופעת הגאות מתרחשת גם על פני הירח.

מדוע מתרחשת תופעת הגאות והשפל?

נתייחס תחילה לתופעת הגאות והשפל על פני כדה״א.
המשיכה הגרוויטציונית של הירח חזקה יותר בצד של הארץ שפונה אל הירח וחלשה יותר בצד הרחוק מהירח. הדבר גורם לעיוות פני כדה״א, או לעין ״מתיחה״ של הכדור לאורך הקו המחבר את הארץ ואת הירח. לאורך קו זה נוצרות שתי בליטות - האחת בכיוון הפונה אל הירח, והשנייה בכיוון הנגדי (ראה איור 23); באזור שבו נמצאות הבליטות מתקבלת תופעת **הגאות**.



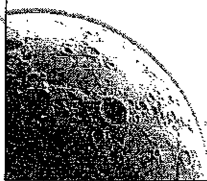
איור 23: גאות ושפל על פני כדה״א

עיוות כזה מתרחש הן בחלק המוצק של הארץ והן במי האוקיאנוסים; המים נענים לכוח המעוות במידה שעולה בהרבה על מידת ההיענות של החלק המוצק, ולכן הבליטות שנוצרות באוקיאנוסים גבוהות בהרבה מאלו שנוצרות ביבשות. תופעת **השפל** מתקבלת על שפת האוקיאנוסים, כאשר הבליטה נמצאת במרכז האוקיאנוס.

כאשר נבחן את מצב המערכת ירח - כדה״א מנקודת ייחוס של הירח, נוכל לומר שכדה״א מסתובב סביב הירח, ולכן ניתן לנסח לגביו את משוואת ניוטון:

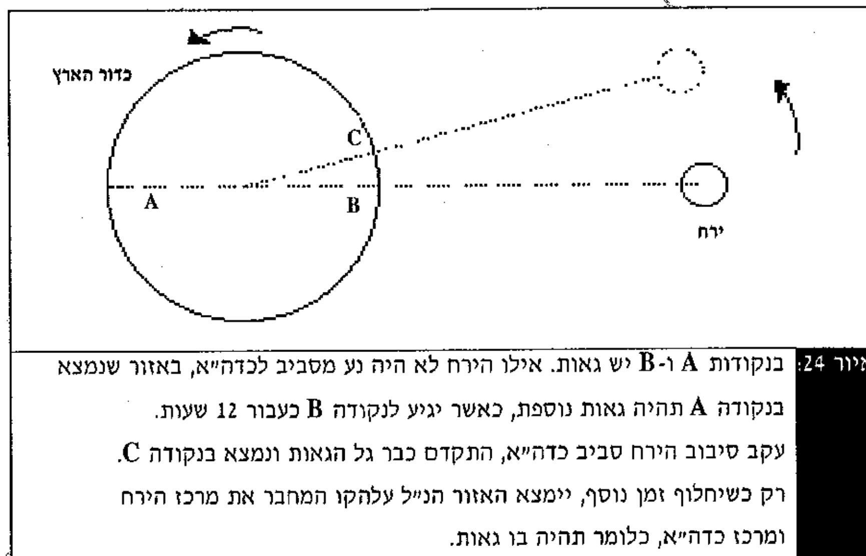
$$\frac{G M_M M_E}{r^2} = M_E \omega^2 r)$$

כאשר M_M - מסת הירח, M_E מסת כדה״א, r - המרחק בין מרכז הירח למרכז כדה״א. למעשה, המשוואה מתקיימת לגבי נקודה אחת בלבד - מרכז כדה״א; בחלקים הקרובים אל הירח פועל כוח גרוויטציה גדול מהכוח הצנטריפטלי, שדרוש לקיום התנועה המעגלית של כדה״א סביב הירח. זה מסביר את קיומה של הבליטה על פני כדה״א בצד הקרוב אל הירח. בחלקים הרחוקים מהירח כוח הגרוויטציה שקיים בפועל חלש מכדי להוות את הכוח הצנטריפטלי, שדרוש לקיום התנועה המעגלית של כדה״א מסביב לירח, וזה מסביר את קיומה של הבליטה בצד הרחוק מהירח. במערכת הייחוס של כדה״א ניתן להסביר זאת ככוח צנטריפוגלי.



הפרש הזמנים בין גאות לשפל:

מאחר וכדה"א משלים סיבוב אחד ביממה סביב צירו, שתי הבליטות נעות יחסית לפני כדה"א. באותה המידה ניתן לומר שפני כדה"א נעים ביחס לגל הגאות שכולל שני שיאים. לפיכך הזמן שחולף כאשר נקודה מסוימת על פני כדה"א נעה בין שני שיאי הגאות הללו, צריך להיות שמחצית היממה - 12 שעות. מאחר שהירח סובב סביב הארץ בכיוון סיבוב הארץ סביב צירה (מזרחה), חולפות יותר מ-12 שעות בין גאות אחת לגאות הבאה אחריה (ראה איור 24). חישוב פשוט מראה כי משך העיכוב הנו כ-25 דקות: הארץ סובבת סביב צירה בקצב של 15 מעלות לשעה; קצב הסיבוב של הירח מסביב לכדה"א הינו 0.51 מעלות לשעה, קצב התזוזה הזוויתית של גל הגאות ביחס לפני כדה"א שווה להפרש המהירויות הזוויתיות הנ"ל, כלומר 14.49 מעלות לשעה. לכן הפרש הזמנים בין גאות אחת לזו שאחריה יהיה 12.42 דקות או 12 דקות ו-25 דקות. כתוצאה מכך הפרש הזמנים בין גאות לשפל יהיה שש שעות ו-12.5 דקות, במקום שש שעות.



איור 24: בנקודות A ו-B יש גאות. אילו הירח לא היה נע מסביב לכדה"א, באזור שנמצא בנקודה A תהיה גאות נוספת, כאשר יגיע לנקודה B כעבור 12 שעות.
עקב סיבוב הירח סביב כדה"א, התקדם כבר גל הגאות ונמצא בנקודה C.
רק כשיחלוף זמן נוסף, יימצא האזור הנ"ל עלהקו המחבר את מרכז הירח ומרכז כדה"א, כלומר תהיה בו גאות.

7. שינוי קצב הסיבוב של הירח ושל כדה"א סביב ציריהם

כתוצאה מאופיו הפלסטי של החומר שממנו עשויים פני כדה"א, עובר זמן מסוים עד שחומר שהורם על-ידי בוחנת הגאות, יורד בחזרה. כתוצאה מכך השיאים של גל הגאות נעים על פני כדה"א במהירות גדולה בהשוואה למהירות נקודות החיתוך של הקו המחבר את מרכז הירח ואת מרכז כדה"א. במילים אחרות - הבליטה שעל פני כדה"א נמצאת כל הזמן מעט קדימה (מזרחה) ביחס לנקודה על פני הארץ, שנמצאת בדיוק מתחת לירח. למעשה, הירח מפעיל על כדה"א כוח שאינו בדיוק לאורך הקו שעובר בין המרכזים שלהם. הדבר יוצר מומנט פיתול על הארץ וגורם לכוח מאיץ שפועל על הירח. התוצאה היא העברה של אנרגיית סיבוב מהארץ לירח, מה שגורם להאטה של סיבוב הארץ ב-1.5ms למאה שנה ומעלה את הירח למסלול גבוה יותר ב-3.8 ס"מ לשנה. במילים אחרות, התנע הזוויתי של המערכת צריך להישמר, ולכן הירח מתרחק.

המנגנון הזה אחראי גם לעובדה שתנועת הירח מסונכרנת, כלומר שקצב הסיבוב שלו סביב צירו שווה לקצב הקפתו את הארץ. בדיוק כפי שקצב הסיבוב של כדה"א סביב צירו יורד בהשפעת הירח, כך הואט בעבר הרחוק קצב הסיבוב של הירח סביב צירו בהשפעת הארץ, אולם אז הייתה ההשפעה הרבה יותר חזקה בגלל האלסטיות הנמוכה של החומר שממנו בנויים פני הירח.

כאשר השתווה קצב הסיבוב של הירח סביב צירו לקצב הקפתו את כדה"א, כך שהבליטה פונה תמיד לכיוון כדה"א ולא נעה על פני הירח, לא הופעל מומנט פיתול על הירח. זהו מצב יציב, שאליו הגיעו מרבית הירחים במערכת השמש. בסופו של דבר סיבוב הארץ סביב צירה יואט, עד שישתווה לזמן ההקפה של הירח, כמו במקרה של פלוטו וחרון.

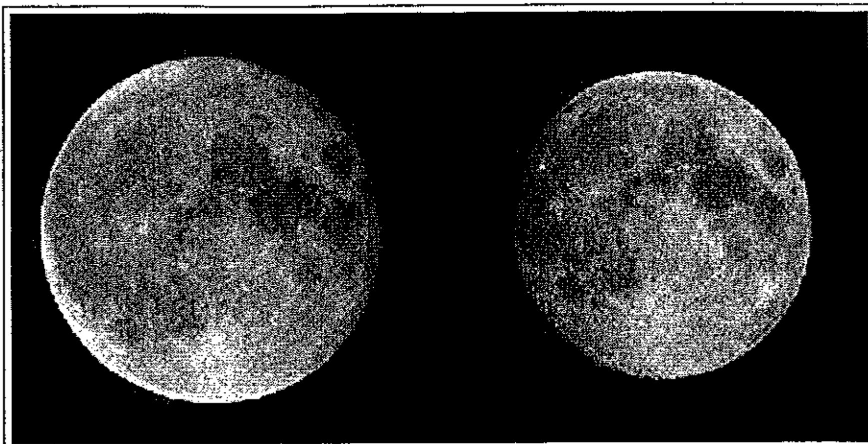
8. פני הירח

כאשר צופים בירח בעין רגילה ניתן להבחין בבהירויות שונות של חלקים שונים של פניו. הדבר תועד עוד לפני עידן הטלסקופ בשרטוטים, שהמפורסמים והטובים שבהם היו של ז'אן-ואן-אייק בראשית המאה ה-15 ושל ליאונרדו דה-וינצ'י בראשית המאה ה-16.
כאשר התבונן גלילאו בפני הירח בעזרת טלסקופ בשנת 1609, הוא הבחין בשני סוגים עיקריים של פני קרקע בירח: אזורים כהים, שאותם הוא כינה **(Maria)** ימות, ואזורים בהירים, זרועי מכתשים, שאותם כינה **(Terra)** אדמה. מאוחר יותר (אמצע המאה ה-17), העניק ג'ובאני ריקולי לאזורים הכהים הקטנים יותר את השמות אגמים **(Lacus)**, ביצות **(Palus)** או מפרצים **(Sinus)**. הוא גם החל לקרוא למכתשים בשמותיהם של מלומדים מפורסמים. רוב המכתשים בצד הקרוב נקראים על שמם של אישים מפורסמים כמו טיכו, קופרניקוס ופתולומיאוס. הצורות על הצד הרחוק של הירח נושאות שמות מודרניים יותר, כגון אפולו, גגארין (הדגש הרוסי נובע מהעובדה שהתמונות הראשונות התקבלו על-ידי **Luna 3**). ההרים על פני הירח קיבלו את שמותיהם של רכסי הרים על פני כדה"א.
כיום ידוע שהאזור ההררי מרובה המכתשים הנו אזור עתיק, ואילו הימות החלקות יחסית צעירות יותר. הימות, שמהוות 16% מפני הירח, הינן מכתשים ענקיים, שמאוחר יותר הוצפו בלבה נוזלית. מרבית השטח מכוסה ברגוליט תערובת של אבק דק ונפולת שברי סלעים שנוצרו כתוצאה מפגיעת מטאוריטים. מסיבה שאינה ידועה הימות מרוכזות בצד הקרוב לכדה"א.

איזה חלק מפני הירח רואים מכדה"א?

מסלולו של הירח מסביב לכדה"א אינו מעגלי, אלא אליפטי, בעל אקסצנטריות נמוכה - 5.49%. כתוצאה מכך גודלו הזוויתי אינו קבוע, ומשתנה ב-0.06^0 בקירוב, שינוי של כ-12%. בתמונה 25 ניתן לראות שינוי זה. אולם כשבוחנים היטב את שני הצילומים, אפשר לראות שגודל הדמות של הירח אינו ההבדל היחיד ביניהם קיים שוני גם במיקום הצורות השונות על פני דיסקת הירח.





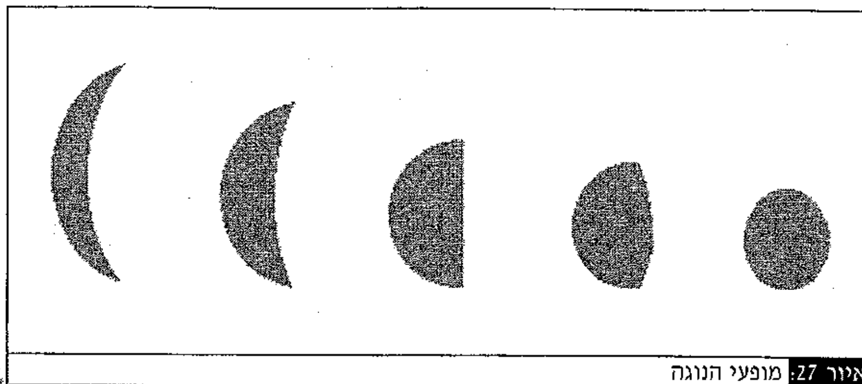
איור 25: הירח בנקודה הרחוקה ביותר במסלולו סביב כדה"א **Apogee** (מימין)
ובנקודה הקרובה ביותר במסלולו **Perigee** (משמאל)
באדיבות האתר: **http://www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html**

יוצא שבכל אחד מהצילומים נראה חלק קצת שונה של פני הירח. אם כן, האם הטענה שהירח מפנה כל הזמן מחצית מפניו לכיוון כדה"א אינה מדויקת?
התשובה לשאלה זו נעוצה בעובדה, שמסלול הירח נטוי מעט - 5^o בקירוב - למישור המילקה. עובדה זו וכן העובדה שצורת המסלול של הירח הימנה אליפסה, גורמות לכך שהירח נראה מתנועע מעלה ומטה, ימינה ושמאלה, במהלך הקפתו את כדה"א. תנודות אלו מאפשרות לנו לראות במהלך הזמן יותר מ-59% מפניו של הירח.

9. מופעים של פלנטות אחרות

הפלנטות הפנימיות

ונוס (נוגה) ומרקורי (כוכב חמה) נמצאים בין השמש ובין כדה"א; כאשר צופים בתנועתם ביחס לקו ארץ-שמש, ונוס ומרקורי נראים נעים סביב השמש נגד כיוון השעון, כאשר הם נעים מצד אחד של השמש לצד האחר.
מהנקודה שבה הם קרובים ביותר לכדה"א על הקו המחבר את כדה"א ואת השמש (מצב זה נקרא צירוף מינימלי (או **inferior conjunction**), הפלנטות הללו נראות נעות במהירות מערבה מהשמש, והמופע שלהן גדל ממולד לחצי-סהר. כאשר אחת מהפלנטות הללו מגיעה למרחק הזוויתי הגדול **(maximum elongation)** ביותר מערבה לשמש, היא בולטת בשמים שלנו **ככוכב בוקר**, והמופע שלה הנו רבע ראשון (ימני). מכאן היא הופכת את כיוון תנועתה ונעה מזרחה לעבר השמש, עד אשר היא נמצאת בנקודה הרחוקה ביותר על הקו המחבר את כדה"א ואת השמש **(superior conjunction)**, ולמעשה מוסתרת על-ידי השמש. הפלנטה ממשיכה לנוע מכאן מזרחה עד לנקודה, שבה המרחק הזוויתי שלה מהשמש מגיע שוב לערכו המקסימלי, ואז היא מופיעה בשמים **ככוכב ערב**, והמופע שלה הנו רבע פעם נוספת (שמאלי).
עם שינוי המופע של ונוס ניתן להבחין גם בשינוי הגודל הזוויתי שלה (ראה איור 26).



איור 27: מופעי הנוגה

מופעי הנוגה התגלו על ידי גלילאו גליליי, כאשר צפה בנוגה דרך טלסקופ שבנה בקיץ 1609, לאחר ששמע על המצאת הטלסקופ. במהלך שנה אחת ביצע גלילאו תצפיות חשובות רבות - הוא צפה בכוכבים, בשמש, בירח ובפלנטות בעזרת טלסקופים קטנים, שאיכותם נמוכה מזו של משקפת מודרנית.

כמה מתגליותיו, ביניהן מופעי הנוגה, שימשו תמיכה במודל ההליוצנטרי, שהוצע על-ידי ניקולס קופרניקוס (Nicholas Copernicus) בשנת 1543 בספרו "על הסיבובים של גרמי השמים".

שינוי הגודל הזוויתי של נוגה, שמלווה את שינוי המופע שלה, ניתן להסבר פשוט בעזרת המודל ההליוצנטרי: זמן ההקפה של נוגה סביב השמש קצר בהרבה מזמן ההקפה של כדה"א את השמש. לכן בחלק מהזמן הנוגה קרובה לכדה"א, כלומר נמצאת במרחב שבין כדה"א לשמש. במצב זה גודלה הזוויתי גדול מחד, ומאידך - לא כל הצד המואר שלה מופנה לכיוון כדה"א, והיא במופע חסר. על-פי המודל הגאוצנטרי, לעומת זאת, אין לצפות לשינוי בגודל הזוויתי של עצם, שמרכז מסלולו המעגלי נמצא בכדה"א.

הפלנטות החיצוניות

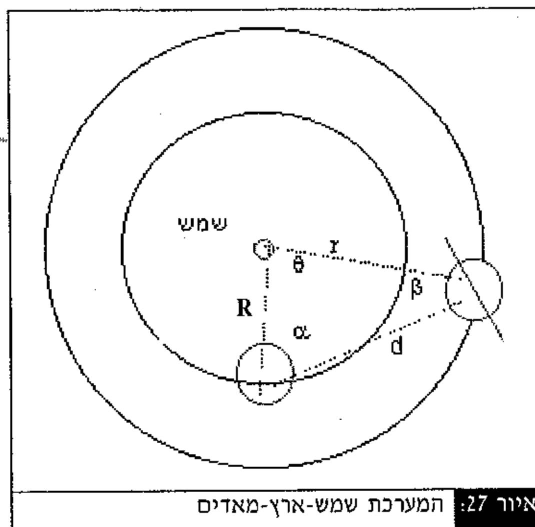
בעוד שהמופע של הפלנטות הפנימיות משתנה, כך שהן נראות לעתים "חסרות", כלומר צדן המואר פונה כולו מכדה"א והלאה, המופע של הפלנטות החיצוניות קרוב תמיד למופע מלא. את מאדים אנו רואים במופע שאינו פחות מ-87%, את צדק במופע של 99% לפחות, והפלנטות הרחוקות יותר נמצאות תמיד במופע גדול מ-99%.

הדיון שמובא כאן נשען על מאמר בנושא מופע הפלנטות החיצוניות שהתפרסם בכתב-העת **The Physics Teacher, Vol. 37, Dec. 1999**.

בעזרת איורים 27 ו-28 נוכל לעקוב אחר חישוב המופע של הפלנטות החיצוניות. תחילה נתייחס לפלנטה החיצונית הקרובה אלינו, מאדים.

באיור 28 נראה "מבט על" של המערכת שמש-מאדים ארץ - כיוון ההסתכלות הוא בניצב למישור המילקה. α מציינת את המרווח הזוויתי שבין מאדים לבין השמש עבור צופה מכדה"א; β מציינת את המרווח הזוויתי שבין השמש וכדה"א עבור צופה ממאדים; θ מציינת את המרווח הזוויתי שבין הארץ ולמאדים מנקודת ראות של השמש. אם נתייחס אל מסלולי הפלנטות כאל מעגלים, נוכל לסמן את מרחק כדה"א מהשמש ב-**R** (יחידה אסטרונומית אחת), ואת מרחק מאדים מהשמש ב-**r**, (1.5 יחידות אסטרונומיות). שלוש זויות אלה קובעות את **d** - המרחק בין כדה"א לבין מאדים. ניתן לראות כי לא כל חציו המואר של מאדים פונה לכיוון כדה"א, כלומר מאדים אינו במופע מלא.





איור 27: המערכת שמש-ארץ-מאדים

באיור 27 מופיע מבט מפורט יותר לכיוון מאדים, מאותו כיוון הסתכלות כמו באיור 26. התבוננות באיור 28 מלמדת שהזווית β מגדירה למעשה את החלק של מאדים, שפונה לכיוון כדה"א אך אינו מואר. זווית זו מקבלת ערך מקסימלי, כאשר מאדים במופע מינימלי, וערכה שווה לאפס בשתי נקודות, כאשר מאדים, כדה"א והשמש נמצאים על אותו קו ישר; בנקודות אלו מאדים במופע מלא.

אם רדיוס מאדים ייחשב 1, ניתן לראות שרוחב החלק המואר (ביחס לקוטר האופקי של דיסקת מאדים) שפונה לכדה"א הנו $(1 + \cos\beta)$. נגדיר את מופע המאדים **F** כאחוז החלק המואר של קוטרו האופקי, כלומר: $F = (1 + \cos\beta / 2)$, ונבדוק מהו הערך המינימלי שהוא יכול לקבל.

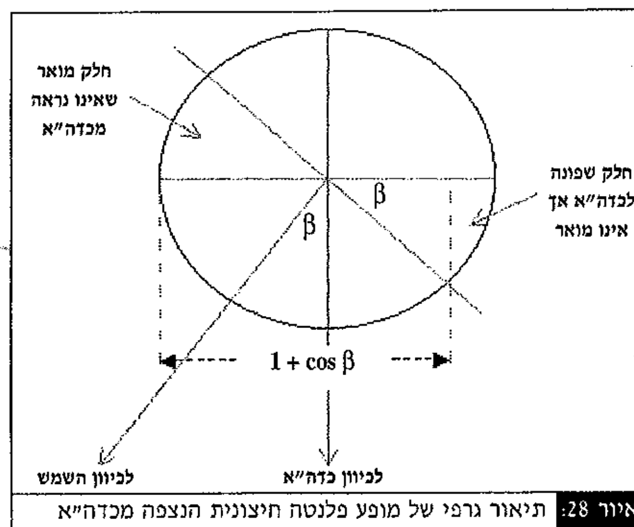
מאיור 28 ניתן לקבל לפי כלל הסינוסים:

$$\sin\alpha\ / r = \sin\beta / R$$

$$\sin\beta = (R / r)\sin\alpha$$

$$\beta = \sin^{-1}((R / r)\sin\alpha)$$

בביטוי זה, כאשר α משתנה בין 0^0 ל-180^0, הארגומנט של הפונקציה ההפוכה $\sin^{-1}$ משתנה מ-0 עד R / r ובחזרה ל-0.
β מקבלת את ערכה המקסימלי עבור $\alpha = 90^0$, וגודלה אז: $(b = \sin^{-1}(R / r)$. עבור מאדים $R / r = 2 / 3$, ולכן $\beta = \sin^{-1} R / r$. לכן המופע המינימלי של מאדים יהיה: $F = 87\%$.
עבור הפלנטות החיצוניות הרחוקות יותר ערך הביטוי R / r קטן יותר, ולכן ערך המופע המינימלי **F** גדול יותר: לגבי צדק, הערך של R / r הוא 1/5 בקירוב, הערך המכסימלי של הזווית β הוא 13^0, והמופע המינימלי $F = 99\%$. לגבי הפלנטות האחרות, ערכו של **F** גדול מ-99%.



איור 28: תיאור גרפי של מופע פלנטה חיצונית הנצפה מכדה"א

10. ליקויים

קוטר הירח (כ-3,500 ק״מ) קטן פי 400 בערך מקוטר השמש (כ-1,400,000 ק״מ), אולם גם המרחק בינו ובין כדה״א קטן בערך פי 400 מהמרחק בין השמש ובין כדה״א. פירוש הדבר שהגודל הזוויתי של הירח ושל השמש דומה למדיי, בערך 0.5°. צירוף מקרים מיוחד זה מאפשר קיומם של אירועים מרשימים וחשובים מבחינה מדעית - ליקוי חמה מלא וליקוי ירח מלא.

ליקוי ירח יכול להיות מכמה סוגים: מלא או חלקי. הוא ייראה באותה צורה מכל מקום, שבו הוא ניתן לצפייה על פני כדה״א; ליקוי חמה יכול להיות חלקי, מלא או טבעתי; במקרה של ליקוי מלא, ניתן לראותו מאזורים מסוימים על פני כדה״א כליקוי מלא, ומאזורים מסוימים כליקוי חלקי. בשנה אחת יכולים להתרחש עד שלושה ליקויי ירח; בדרך-כלל מתרחשים שני ליקויי ירח ושני ליקויי חמה. הפרש הזמנים בין ליקוי חמה לליקוי ירח הנו על פי רוב כשבועיים.

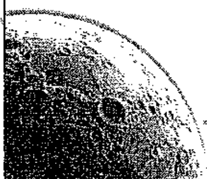
ליקוי חמה מתרחש, כאשר הירח נמצא בין כדה״א ובין השמש - בראשית החודש הירחי, כך שמאזורים מסוימים בכדה״א לא ניתן לראות את השמש במלואה. ליקוי ירח מתרחש, כאשר כדה״א נמצא בין השמש ובין הירח - באמצע החודש הירחי, ואז מאזורים מסוימים בכדה״א לא ניתן לראות את הירח במלואו.

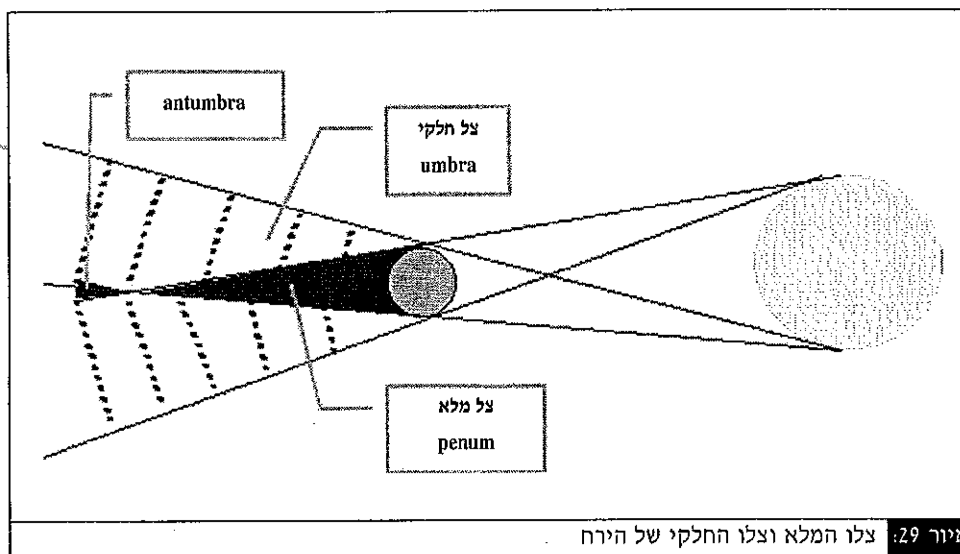
ליקויים אינם מתרחשים כל חודש בגלל הנטייה של מישור התנועה של הירח סביב כדה״א ביחס למישור התנועה של הארץ סביב השמש. מישור זה נטוי מעט (בערך 5^{0}) למישור התנועה של כדה״א מסביב לשמש (מישור המילקה), ולכן הירח בדרך-כלל אינו נמצא על הקו הישר שעובר דרך מרכזיהם של השמש וכדה״א, ולא מתרחש ליקוי ירח. כאשר נוצר מצב בו שלושת הגופים נמצאים על אותו קו ישר, יתרחש ליקוי. מצב זה מתקבל, כאשר שלושת הגופים נמצאים לאורך קו החיתוך של שני מישורי התנועה - מישור התנועה של הירח סביב כדה״א ומישור המילקה.

ליקוי חמה

בראשית החודש הירחי תרוט הצל המלא של הירח (**Umbra**) וכן אזורי הצל החלקי של הירח (**Penumbra**) משתרעים במרחב שבין הירח לבין כדה״א (ראה איור 29). בדרך-כלל, כאשר הירח וצלליו נמצא מחוץ למישור המילקה, צללים אלו אינם מוטלים על פני כדה״א. אם שלושת הגופים: שמש, ירח, ארץ יסתדרו במרחב כך שחלקים של כדה״א יהיו באזור הצל של הירח, יתקבל ליקוי חמה.

בנוסף לעובדה שהירח וצלליו מתרחקים ממישור המילקה ומתקרבים אליו בגלל נטיית מישור תנועתו של הירח ביחס למישור המילקה, גם המרחק של הירח מכדה״א משתנה, מכיוון שמסלולו של הירח מסביב לכדה״א הנו מסלול אליפטי: המרחק המקסימלי הנו 406,700 ק״מ (**apogee**), והמינימלי 365,400 ק״מ (**perigee**). שינוי מרחק הירח מכדה״א גורם לשינוי גודלו הזוויתי בין 1,764 שניות קשת (0.49 מעלה) ל-2,012 שניות קשת (0.558 מעלה). גם מסלול ההקפה של הארץ מסביב לשמש הינו אליפטי, וכתוצאה מכך גודלה הזוויתי של השמש משתנה בין 1,844 שניות קשת (0.512 מעלה) באפהליון (**Aphelion**) לבין 1,952 שניות קשת (0.542 מעלה) בפריהליון (**Perihelion**). מכאן שהגודל הזוויתי של הירח עשוי להיות גדול ב-7% (או 2 דקות קשת) מגודלה הזוויתי של השמש. ולהפך, אפשרי גם מצב שבו גודלו הזוויתי של הירח יהיה קטן ב-10% או 3 דקות קשת מגודלה הזוויתי של השמש.





איור 29: צלו המלא וצלו החלקי של הירח

לכן אם התנאים לליקוי מתמלאים, יכול להיווצר ליקוי מכמה סוגים:

ליקוי מלא: יתרחש כאשר כדה"א והירח קרובים, וגודלו הזוויתי של הירח שווה לגודלה הזוויתי של השמש או עולה עליו. במצב זה אזור מסוים של כדה"א יימצא באזור הצל המלא הקרוב אל הירח (**Umbra**); באזור זה תוסתר השמש לגמרי על-ידי הירח. הצל המלא של הירח עובר על פני כדה"א ממערב למזרח, כך שבמהלך 7.5 דקות בערך תהיה השמש מוסתרת מעיניו של צופה בנקודה נתונה. באותו זמן ניתן לראות את עטרת השמש, היא נראית כמו הילה מסביב לירח, והאזור ייראה כמו בשעת דמדומים.

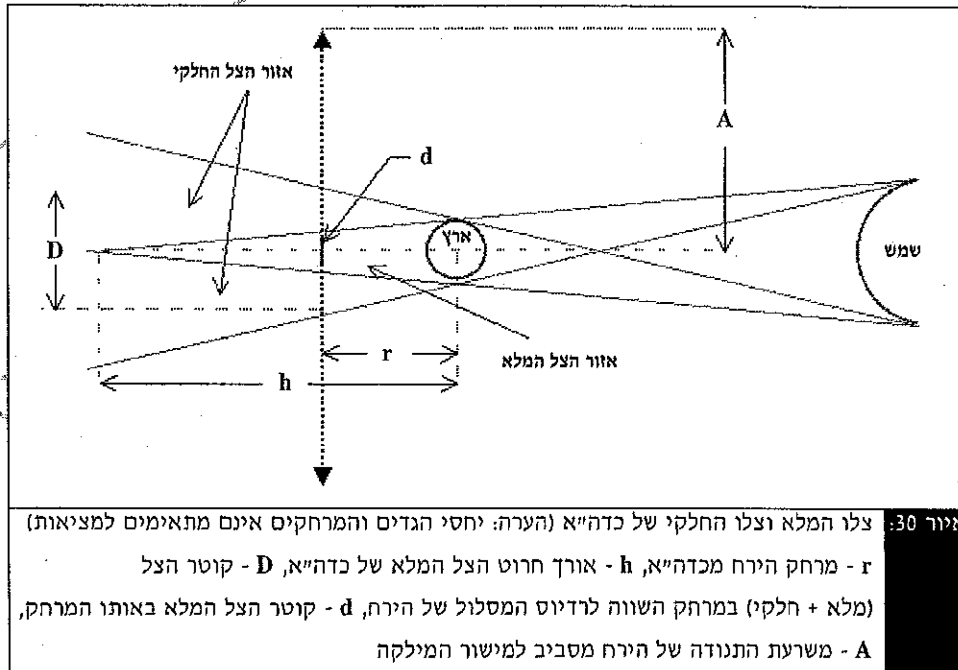
לעתים נדירות, אם הירח נמצא בסמוך לנקודה הקרובה ביותר לכדה"א (**Perigee**), והארץ נמצאת באפהליון, קצהו של חרוט הצל עובר את מרכז כדה"א ב-23,500 ק"מ, וקוטר האזור שממנו נצפה הליקוי המלא יכול להגיע ל-273 ק"מ. שמסביב לאזור שבו מתרחש ליקוי מלא, יוטל על כדה"א צלו החלקי של הירח (**Penumbra**), וניתן יהיה לראות ממנו **ליקוי חלקי** - השמש תוסתר בחלקה על-ידי הירח. קוטרו של אזור זה הוא כ-7000 ק"מ.

ליקוי חלקי: במצב שבו הצל המלא חולף מעבר לשוליו של כדה"א, ורק צלו החלקי של הירח מוטל על פני כדה"א, יתרחש רק ליקוי חלקי.

ליקוי טבעתי: יתרחש כאשר המרחק בין כדה"א ובין הירח גדול מאורך חרוט הצל המלא (**Umbra**), וגודלו הזוויתי של הירח קטן מזה של השמש. לדוגמה, אם הירח בנקודה הרחוקה ביותר (**Apogee**) והארץ בפריהליון, קצה חרוט הצל (**Umbra**) יימצא במרחק 33,000 ק"מ מעל פני כדה"א. חלק מכדה"א יימצא באזור החרוט הנגדי, שקוטרו יכול להגיע ל-313 ק"מ. הירח ייראה מאזור זה כצללית על רקע הפוטוספרה הבהירה של השמש; את העטרה לא ניתן לראות בגלל העוצמה המסנוורת של הפוטוספרה. הליקוי שייראה מאזור זה יהיה ליקוי טבעתי; מסביב לאזור זה ניתן יהיה לראות **ליקוי חלקי** - הסתרה של חלק מהשמש, כשצורת החלק הגלוי אינה

ליקוי ירח

ליקוי ירח מתרחש כאשר כדה"א נמצא בין השמש לירח באמצע החודש הירחי, והירח עובר דרך צלו של כדה"א. אם הירח יחלוף בשולי חרוט הצל המרכזי (Umbra), או אם הוא יחלוף דרך הצל החלקי (Penumbra), כך שחלק מפניו יוארו על-ידי השמש, יתרחש ליקוי חלקי; אם הירח כולו יעבור דרך חרוט הצל המרכזי (Umbra), יתרחש ליקוי מלא (ראה איור 30).

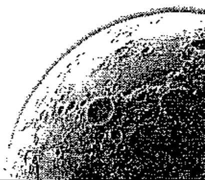


איור 30: צלו המלא וצלו החלקי של כדה"א (הערה: יחסי הגדים והמרחקים אינם מתאימים למציאות)
r - מרחק הירח מכדה"א, **h** - אורך חרוט הצל המלא של כדה"א, **D** - קוטר הצל (מלא + חלקי) במרחק השווה לרדיוס המסלול של הירח, **d** - קוטר הצל המלא באותו המרחק, **A** - משרעת התנודה של הירח מסביב למישור המילקה

אורך חרוט הצל המלא שנוצר על-ידי כדה"א (והשמש) גדול מרדיוס מסלול הירח r ב-1,000,000 ק"מ בקירוב. קוטרו של חתך החרוט **d** במרחק 384,000 ק"מ מכדה"א (מרחק הירח מכדה"א) הנו כ-9,000 ק"מ, כלומר גדול יותר מקוטר הירח (כ-3,500 ק"מ); כמו-כן קוטר אזור הצל החלקי של כדה"א (שכולל בתוכו את הצל המלא) במרחק 384,000 ק"מ, **D**, עולה על 16,000 ק"מ. לפי נתונים אלו אפשר לצפות לליקוי ירח בכל חודש! אולם נטיית מישור התנועה של הירח ביחס למישור המילקה בשיעור של 5° בערך גורמת לכך שמשרעת תנודתו של הירח סביב מישור המילקה, **A**, היא 33,600 ק"מ לערך. רדיוסו של אזור הצל ($D/2$) קטן יותר מפי ארבעה ממשרעת זו, ולכן לא בכל פעם שכדה"א נמצא בין הירח לבין השמש מתרחש ליקוי הירח יכול לחלוף מחוץ לאזור הצל של כדה"א, ואז לא מתרחש ליקוי.

אם מתייחסים לרכיב הניצב למישור המילקה של התנועה שמבצע הירח כאל תנועה הרמונית, שזמן המחזור שלה 27.3 יממות, יוצא שבמהלך מחזור אחד של תנועתו הירח שוהה כארבעה ימים בלבד במרחק שאינו עולה על 8,000 ק"מ ממישור המילקה ($D/2$); מאחר שזמן המחזור של הקפת הירח מסביב לכדה"א וזמן המחזור של הקפת הארץ מסביב לשמש אינם תלויים, יוצא שלא בכל חודש שוהה הירח בארבעת הימים הללו באזור הצל של כדה"א (למעשה הוא יכול להיות בקטע של מסלולו, שבו הזווית בינו לבין השמש שונה לחלוטין מ-180°, כלומר לאו דווקא באמצע החודש הירחי), ובחודש כזה אין סיכוי להתרחשות ליקוי.





מופעי ירח ושעון ירח

פרק ד': המרחק לירח וגודל זוויתי

פעילות 7: מדידת המרחק לירח

מה דעתך?

השאלה עד כמה רחוקים גרמי השמים מאתנו הטרידה אנשים מאז ומתמיד. אך כיצד ניתן למדוד את המרחק בשמים? לשם כך היה צורך להמתין לאוקלידס (283-306 לפנה״ס) ולהמצאת גאומטריית המישור. היכולת להעריך את המרחקים בחלל התבססה על ניסיון שנצבר על פני כדה״א. מדידת מרחקים בחלל יכולה להתבצע רק על-ידי מדידה עקיפה, בדומה למדידה של גובה גורד-שחקים או של הר נישא.

חוקי הגאומטריה תרגמו לשפה לוגית ניסיון אנושי שנצבר עוד לפני כן. למרות שהמצרים לא ניסחו את חוקי הגאומטריה, הם הכירו חלק מהם על סמך ניסיונם והפליאו לתכנן ולבנות מבנים מרשימים בגודלם ובמורכבותם. כך שהגאומטריה הייתה בבסיס ההבנה של מהנדסים שקדמו לאוקלידס, אך לא ידעו לנסחה בבהירות ובדרך לוגית מלוטשת, כפי שעשה זאת אוקלידס. לדוגמה: אחת התופעות המוכרות מניסיון החיים היומיומי היא שעצם קרוב נראה לנו גדול יותר מאשר עצם רחוק. לפי חוקיות זו מצליחים נהגים להחליט אם ניתן לצאת לעקיפה גם בלי שהם מכירים את חוקי האופטיקה הגאומטרית. חוקיות זו קלה להפעלה כל עוד שני עצמים בעלי אותו גודל נמצאים במרחקים שונים. אומדן המרחק היחסי לשני עצמים שאין ודאות ביחס לגודלם, קשה, ולכן יש צורך בדרכים אחרות כדי להעריך את מרחקם זה מזה.

תופעה שנייה המוכרת מניסיון החיים מתייחסת לתנועת עצמים. שני עצמים הנעים באותה מהירות, אך מרחקם שונה מאתנו ייראו לצופה בהם כאילו מהירותם שונה. העצם הקרוב ייראה כאילו הוא נע מהר יותר ביחס לעצם הרחוק. תופעה זו משמשת אותנו בתחילת הפעילות. בשלב ״מה דעתך?״ מופיעות שתי תמונות של שלושה גרמי שמים, שצולמו בהפרש של 12 שעות. התלמידים מתבקשים להעריך מי מבין שלושת גרמי השמים קרוב יותר. למרות שהם אינם יכולים למדוד מרחק זה, מרביתם מצליחים לדרג את שלושת המרחקים נכונה. הערכה זו נשענת על שתי התופעות שהזכרנו.

ההשוואה בין שני התצלומים מלמדת שניתן לדרג את הנוגה, הירח ושבתאי בשתי דרכים:

א. לפי הגודל מהגדול לקטן: ירח, נוגה, שבתאי.

ב. לפי מידת התזוזה - מהרבה ביותר להמעטה ביותר, שוב: ירח, נוגה, שבתאי. מדידת התזוזה מתבצעת ביחס לכוכבי הייחוס של קבוצת דגים.

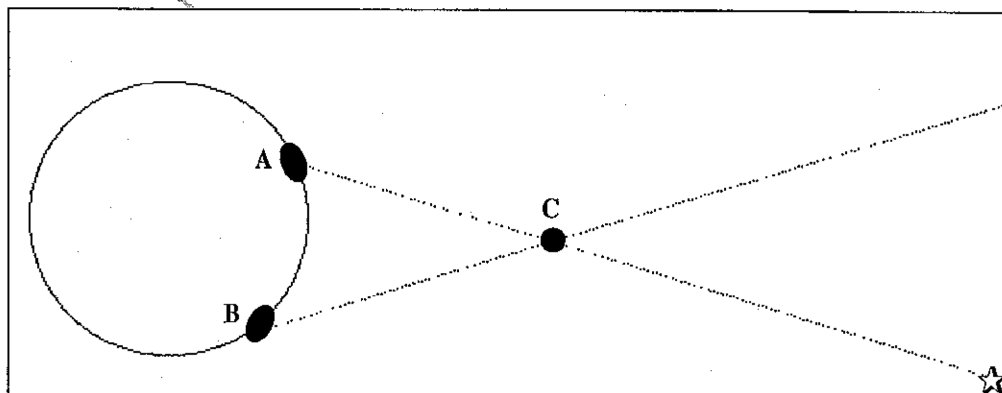
בדרך-כלל תלמידים אינם מתקשים לדרג את גרמי השמים שבשני התצלומים. אך ביחס לשאלה השנייה הקשורה במציאת שיטה, המצב מורכב יותר. קשה לתרגם את האינטואיציה לדרך עבודה שיטתית המאפשרת למדוד את המרחק אל גרם שמים, שלא ניתן להגיע אליו.

רצוי לאפשר לתלמידים לענות תחילה בצורה אישית. תלמידים רבים מדרגים את סדר גרמי השמים לפי מרחקם מהארץ לפי גודלם, אך אינם שמים לב לתזוזה היחסית שלהם ביחס לקבוצת כוכבי הרקע במזל דגים. רק לאחר שהתלמידים סיכמו בכתב את עמדתם האישית, יש לעבור לדיון קבוצתי, שניים-שלושה תלמידים בקבוצה ישוו את העמדות ואת הנימוקים לעמדותיהם תוך שימת-לב לעמדות שונות משלהם. סיכום שלב זה ייעשה בדיון כיתתי קצר, שבו זה רצוי להדגיש את חשיבות כוכבי הייחוס והתנועה היחסית של גרמי השמים, הנמדדת ביחס אליהם. ניתן בשלב זה להעלות את השאלה מדוע איננו מרגישים את תנועת כדה״א במסלולו סביב השמש, למרות שמהירותה היא כ-30 קי״מ בשנייה או כ-100,000 קמ״ש.

חלק א: מדידת מרחק בקריצה

פרלקסה עניין של זווית ראייה

תופעת הפרלקסה סותרת את האינטואיציה של אנשים רבים. מסתכלים על עצם מנקודות שונות, העצם לא זז, הצופה לא זז, ובכל זאת משתנה מקום האצבע ביחס לקו הייחוס. הגורם לכך הוא שינוי בנקודת הראות. במקרה שאותו נחקור, השינוי מתבצע במיקום העין המתבוננת. שינוי שאינו מורגש כמעט, בעוד ששינוי מיקומה של האצבע ביחס לקו הייחוס על הלוח הוא משמעותי מאוד. נוצרת תחושה של פרדוקס, למרות שכביכול לא הזזנו דבר, האצבע מרקדת. ניתוח התופעה וחקירת התזוזה המדומה של האצבע הם מפתח למדידת מרחקים בדרך עקיפה. צעד קטן המאפשר לנו דילוג גדול בסרגל המדידה שלנו, המופנה אל מרחבי החלל. המעבר מניסוי האצבע למדידה בחלל מודגם באיור הבא:



איור 1: הדגמת גישת הפרלקסה. ניתן להתייחס אליו בשתי דרכים:

א. שינוי המיקום של האצבע ביחס לציור הכוכב, כאשר מתבוננים באצבע (C) בכל פעם בעין אחרת. כאשר עין A מתבוננת האצבע מסתירה את איור הכוכב, הנמצא על הלוח. אך כאשר עין B מתבוננת, האצבע מסתירה אזור אחר, המרוחק מאיור הכוכב.

ב. שינוי המיקום של גוף שמימי ביחס לכוכב מרוחק, כאשר מתבוננים בו משתי נקודות שונות על פני כדה״א. כאשר מתבוננן אל גוף שמימי (ירח או כוכב קרוב), נוכל לראות שינוי במיקום שלו ביחס לכוכב רחוק. ממצפה A גרם שמימי C מסתיר כוכב מרוחק, בעוד שממצפה B הוא מרוחק ממנו.

מדידת אורך הזרוע בדרך עקיפה פרלקסה

תופעת הפרלקסה מפתיעה את אלה הרואים אותה בפעם הראשונה. זהו ניסוי חביב שהתלמידים ששים להציע לו הסברים. העובדה שאצבע "מרקדת", כאשר אנחנו עוצמים עין אחת ולאחר מכן את השנייה מעוררת התלהבות. כיצד ניתן להסביר את תנועת האצבע עם חילופי נקודת הראות? בדרך-כלל התלמידים נוטים להתייחס רק לשני גורמים: א. האצבע ב. הקו על הלוח. התייחסות זאת יוצרת פרדוקס "איך זזה האצבע בלי שהזזתי את היד?" פתרון הפרדוקס נשען על שילוב נקודת הראות של הצופה. ניתן בהזדמנות זו לשוחח על חשיבות הצופה בתהליך המדידה המדעית.

החלק השני של הפעילות מנסה למצוא קשר בין מרחק האצבע מהעין לבין מידת התזוזה שלה. רצוי לבקש מהתלמידים להעריך מה יקרה למידת התזוזה של האצבע, כאשר נקרב אותה לעין. בדרך-כלל תלמידים רבים נוטים להניח שככל שנקרב את האצבע, תקטן מידת התזוזה, ייתכן שהסיבה לכך היא השערת התלמידים בדבר קיומו של יחס ישר בין מידת הקרבה של האצבע לעין לבין מידת התזוזה שלה. אותם תלמידים מופתעים לגלות שדווקא הקטנת המרחק מהעין גורמת לתזוזה גדולה יותר.

פרלקסה בחיי היומיום

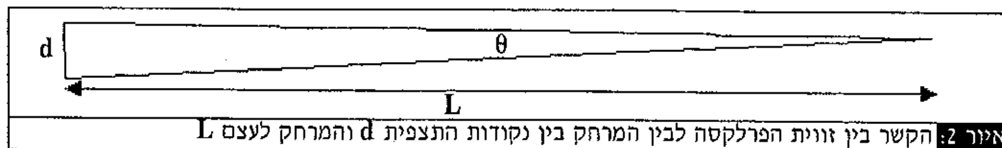
בחיי היומיום אנו נשענים על תופעת הפרלקסה בלי לבטא זאת באופן מפורש או לבצע חישובים בעזרתה. שינוי מיקומם הזוויתי של עצמים נייחים, כאשר אנו זזים, הוא דוגמה אופיינית לכך. כאשר אנו נוסעים במכונית, העצים בסמוך לדרך נעים ביחס אלינו, בעוד שעצמים רחוקים כמעט אינם זזים. ניתן להיזכר בפליאה בתופעה שבה אנו נוסעים לאורך דרך ארוכה, והנוף משתנה ללא הרף, אך בשמים הירח מוסיף ללוות אתנו, ומקומו בשמים לא משתנה. השינוי במידת התזוזה של עצמים ביחס למרחק מהצופה הוא הבסיס לרעיון הפרלקסה. למעשה, ניתן למדוד את מרחקם של עצמים בהתאם לתנועה היחסית שלהם, כאשר אנו נעים לאורך מסלול מסוים. בשמים כל הכוכבים הקרובים משלימים מסלול אליפטי במשך שנה כתוצאה מתנועת הארץ סביב השמש. גודל האליפסה שלהם קובע את מרחקם מאתנו. ככל שהאליפסה של תנועתם גדולה יותר, כך ניתן לקבוע שהם קרובים אלינו יותר.

פרלקסה עיסוק בזוויות קטנות

בכל המדידות הפרלקטיות בשמים אנו עוסקים בזוויות קטנות, קטנות מאוד בדרך-כלל פחות משנית קשת אחת. לצורך ביצוע קרובים בדיון שלנו נרחיב את טווח המדידות עד מעלה אחת, גם במקרה זה שגיאת החישוב אינה עולה על אלפית האחוז. המדידות ייעשו ברדיאנים. בדיון זה נאפשר החלפה של **sin** θ או **tg** θ ב-θ.

כאשר 1 מעלה = θ אזי: 0.01745329 רדיאן = θ, **sin** θ = 0.01745240, **tg** θ = 0.01745506

השוואה בין שלושת הגדלים האחרונים מראה שהמעבר בין שלושת הגדלים בזוויות קטנות כרוך בשגיאה הקטנה מאלפית אחוז. לכן בהנחה שאנו עוסקים בזוויות קטנות, ניתן לקבל מיד את משוואת הפרלקסה



איור 2: הקשר בין זווית הפרלקסה לבין המרחק בין נקודות התצפית d והמרחק לעצם L

d = מרחק בין נקודות התצפית

θ = זווית התזוזה של העצם השמימי

L = המרחק אל העצם השמימי

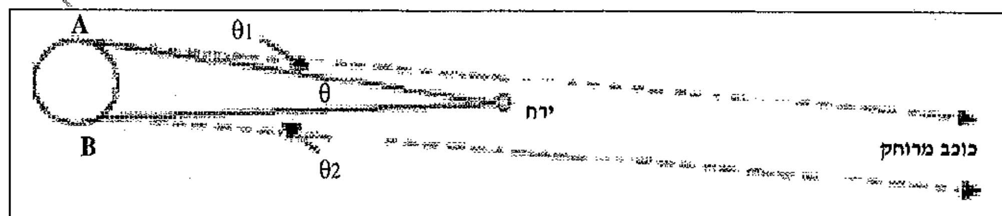
$$L = \frac{d}{\theta (rad)}$$

וכאשר נבטא את במעלות, נקבל את הקשר:

$$L = \frac{d}{\theta (deg)} \times 57.3$$

כיצד ניתן למדוד את θ, כאשר היא נמצאת רחוק מאתנו, סמוך לעצם השמימי?

המדידה של θ נעשית בדרך עקיפה על-ידי מדידה של תזוזת העצם השמימי ביחס לכוכב ייחוס הנמצא רחוק מאתנו. במקרה של הירח הכוכב הקרוב ביותר נמצא במרחק הגדול פי 100 מיליון ממרחק הירח, כך שניתן להניח שקרני האור המגיעות מהכוכב מקבילות לחלוטין ולהזניח כל תזוזה פרלקטית של כוכבי הייחוס. שיטת המדידה של זווית הפרלקסה θ מוצגת באיור 3.



איור 3: מדידת זווית הפרלקסה של הירח ביחס לכוכב מרוחק.
המדידה מבוצעת באותו זמן משתי נקודות מרוחקות על פני כדה"א.

ניתן למדוד את הזווית θ על-ידי מדידה של שתי זוויות אחרות:

1. זווית θ1 הנמדדת ממצפה A היא הזווית שבין הכיוון לכוכב מרוחק לכיוון אל הירח.
2. וזווית θ2 הנמדדת ממצפה B היא הזווית שבין הכיוון לאותו כוכב מרוחק לכיוון אל הירח.

מאיור 3 ניתן לראות שמתקיים הקשר

$$\theta = \theta 1 + \theta 2$$

זהו מפתח נפלא למדידת מרחקים, כאשר המגבלה היא רמת הדיוק שבה ניתן למדוד זוויות, והמרחק המרבי, שבו ניתן להתרחק בין שתי נקודות התצפית. התנאי לקיום המשוואה האחרונה הוא שהמרחק אל הכוכב המרוחק גדול בהרבה מן המרחק של הגוף השמימי מכדה"א. במקרה הירח, הדבר מתקיים עבור כל כוכב.

חלק ב: מקצה האצבע עד לירח

מדידת המרחק לירח בפעילות זו דומה עקרונית לדרך, שבה מתבצעת מדידה של מרחקי כוכבים, אך כאן הסקלות של התזוזה הזוויתית הן מסדר-גודל של מעלה, בעוד שמדידה של מרחקי כוכבים היא מסדר-גודל של חלקי שנית קשת. בפעילות זו הרשינו לעצמנו להוסיף קירובים נוספים כדי לא להתמודד עם דיוקים הנובעים מהעובדה שהירח, שתי נקודות המדידה וכוכב הייחוס אינם נמצאים בדיוק באותו המישור. לצורך הפשטות הרשינו לעצמנו להניח שניתן להסתפק בהנדסת המישור ולא לצרף שיקולים של הנדסת המרחב.

התלמידים שהצליחו להבין את רעיון הפרלקסה, יוכלו בקלות יחסית לעבור מהאצבע המדלגת אל הירח המשנה את מיקומו ביחס לכוכבי הרקע כתוצאה משינוי נקודת התצפית הארצית. התשובות לשאלות המופיעות במהלך הפעילות הן:

א. היות שהמרחק בין קווי-האורך הוא 5 מעלות, והתזוזה היא בעיקרה תזוזה רוחבית, ניתן להעריך שמידת התזוזה היא מסדר-גודל של מעלה.

ב. באיור 7 המרחק בין קווי-האורך (X) הוא 5.0 ס״מ. מרחק הירח מקו-האורך (R) הוא 0.45 ס״מ. לכן המרחק הזוויתי בין הירח לקו האורך הוא:

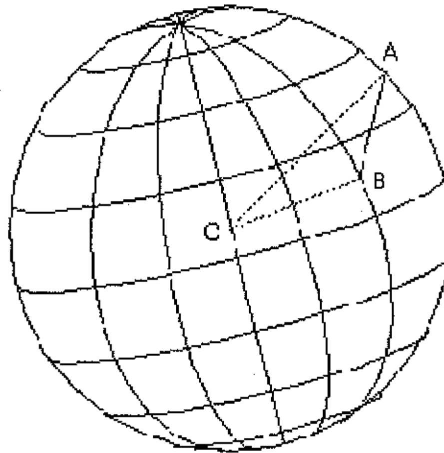
$$(R / X) \times 5 = (0.45 / 5.0) \times 5 = 0.45^0$$

ג. באיור 8 המרחק בין קווי-האורך (X) הוא 5.0 ס״מ. מרחק הירח מקו-האורך (R) הוא 1.10 ס״מ. לכן המרחק הזוויתי בין הירח לקו-האורך הוא:

$$(R / X) \times 5 = (1.15 / 5.0) \times 5 = 1.15^0$$

ד. בדרך דומה ניתן היה למדוד את המרחק של הירח מקווי-הרוחב בשני האיורים ולחשב את התזוזה האורכית של הירח. מדידת שני הגדלים הללו מראה כי ברמת הדיוק העומדת לרשותנו, כ-0.5 מ״מ, לא ניתן למדוד שינוי אורכי. לכן התזוזה הפרלקטית תחושב רק ביחס לשינוי ״הרוחבי״ של הירח. תזוזה זו נובעת מהפרש במדידות, שבוצעו בשני הסעיפים הקודמים. ערך התזוזה הפרלקטית הוא 0.60 מעלה.

ה. בסעיף זה אנו מחשבים את המרחק האופקי שבין שתי נקודות התצפית. בחישוב קו הבסיס הרשינו לעצמנו מספר קרובים כדי להימנע מחישובים מרחביים. כמובן, ניתן לשפר את חישוב קו הבסיס על-ידי הוספה של החישוב המרחבי, כפי שיובא בהמשך. בחישוב קו הבסיס הנחנו קו-רוחב ממוצע 35 מעלות. ההפרש בין קווי-האורך הוא בדיוק 90 מעלות. למרות שהצילום בוצע בדיוק באותו זמן, קיים הפרש בין שעת התצלום בישראל לשעת התצלום בצפון-קוריאה, הפרש השווה לשש שעות. כידוע, במשך שעה סובב כדה״א 15 מעלות סביב צירו. כדי לאפשר שעת זריחה דומה בכל המדינות הותלט על אזורי זמן, שכל אחד מהם הוא ברוחב של 15 מעלות לערך. בשעת התצלום בקוריאה היה הירח קרוב לשקיעה, כלומר סמוך לקו אופק מערב. מכאן שבזמן התצלום בישראל היה הירח סמוך לקו המצהר בשמים. דבר זה אפשר חישוב פשוט של ההפרש האופקי בין שתי הנקודות. במקרה פשוט זה ההפרש שווה לערך לרדיוס של קו-הרוחב, כפי שהוא מופיע בחוברת לתלמיד כ- 5,243 ק״מ. ההנחה שמרחק זה קטן בהרבה בהשוואה למרחק אל הירח, היא הנחה שצריכה להתברר בפסקה הבאה.



איור 5: תיאור המרחק בין נקודות AB על פניו של כדור, שמרכזו נמצא בנקודה C

לפני שניגש לחישוב המרחק אל הירח, נברר עד כמה הקירוב שנקטנו הוא מדויק. לשם כך נשתמש בנוסחה המדויקת לקביעת המרחק בין שתי נקודות על פני מעטפת כדורית.

$$\cos(c) = \cos(90-a) \times \cos(90-b) + \sin(90-a) \times \sin(90-b) \times \cos(\Delta\lambda)$$

או:

$$\cos(c) = \sin(a) \times \sin(b) + \cos(a) \times \cos(b) \times \cos(\Delta\lambda)$$

כאשר:

a = קו רוחב של מצפה כנרת = $32^0\ 45'$

b = קו הרוחב של המצפה בצפון קוריאה = $36^0\ 55'$

$\Delta\lambda$ = הפרש בין קווי האורך = 90^0

נציב:

$$\cos(c) = \sin(32^0\ 45') \times \sin(36^0\ 55') + \cos(32^0\ 45') \times \cos(36^0\ 55') \times \cos(90) = 0.325 + 0 = 0.325$$

מכאן שהזווית המרכזית היא:

$$c = 71^0$$

לכן במקרה זה המרחק r בין A ל-B הוא:

$$r = 2 \times R \times \sin(c/2) = 2 \times 6400 \times \sin(35.5) = 12{,}800 \times 0.58 = 7433\ km$$

שתי הנקודות נמצאות על משולש שווה-שוקיים, שמרכזו בציר הסיבוב של כדה״א, וזווית הראש שלו היא כ-90 מעלות. לכן ההפרש האופקי ביניהן הוא:

$$h = r \times \cos(45) = 7433 \times 0.7071 = 5256\ km$$

הקירוב שנקטנו הניב תוצאה של 5,243, כלומר שגיאה מסדר-גודל של 0.1 אחוז.

יש להעיר כי חקרנו דוגמה זו מקרה פרטי פשוט יחסית, שבו שתי הנקודות נמצאות בקירוב באותו קו-רוחב. כאשר הנקודות אינן נמצאות בקו-רוחב דומה, יש להתמודד עם מערכת חישובים מורכבת יותר החורגת מדיוננו.

בסעיף זה אנו מחשבים את מרחק הירח בהתאם לחוקי הפרלקסה:

$$L = \frac{d}{\theta(deg)} \times 57.3 = \frac{5243}{0.60} \times 57.3 = 500{,}706 \text{ km}$$

זוהי אמנם לא תוצאה מדויקת, אך היא נותנת סדר-גודל של מרחק הירח מהארץ. כידוע, מרחק הירח מהארץ בממוצע הוא כ-400,000 ק״מ. ניתן להיכנס לניתוח שגיאות, שבוצעו במהלך התרגיל, אך אין זו המטרה. התוצאה שהתקבלה מראה כי ההנחה ש $d << L$ היא הנחה סבירה, ותרומתה לשגיאת החישוב היא מסדר-גודל של 1%.

הרחבה פיזיקלית

א. קיצור תולדות מדידת המרחק אל הירח בעזרת פרלקסה

מדידת המרחק אל הירח בוצעה ברמת דיוק מרשימה על-ידי היפרכוס במאה השנייה לפנה"ס, ושיפור נוסף נעשה ע"י פתולומאוס במאה השנייה לספירה. למרחק הירח מכדה"א נודעה חשיבות עליונה בתפיסה הגאוצנטרית של העולם העתיק.

לפי תפיסה זו קיימים ביקום שני חלקים שונים: האזור הארצי והאזור השמימי. האזור הארצי נמשך עד גלגל הירח, ובו חלים חוקים ארציים, בעוד שהאזור שמעבר לגלגל הירח הוא אזור שמימי, ובו שולטים חוקים אחרים הרמוניים הרבה יותר מאלה השולטים באזור הארצי.

הירח הוא גרם השמים הקרוב ביותר לכדה"א. אמנם תופעת הירח "העוקב אחריי" מוכרת, כאשר אנו דנים בנסיעה לאורך מספר קילומטרים. אך כאשר מתבוננים בירח מנקודות תצפית המרוחקות מרחק של אלפי קילומטרים מגלים כי הירח אכן משנה את מיקומו היחסי בהשוואה לכוכבי השמים. כוכב השמים הקרוב ביותר אלינו הוא השמש, ותופעת הפרלקסה באה לידי ביטוי בשעת ליקוי חמה.

בדרך מיוחדת יצר הטבע שוויון כמעט מדויק בין גודלם הזוויתי של השמש ושל הירח - כחצי מעלה בקרוב. כך בשעת ליקוי חמה, כאשר הירח מכסה בדיוק את דיסקת השמש, נוצר חושך באזורים מסוימים על פני כדה"א. האזורים שבהם נראית התופעה של חושך באמצע היום, הם צרים למדיי ברוחב של כמאה ק"מ. אך אם נתרחק מאזור זה רק כמה עשרות ק"מ, לא ייעלם האור, אך עוצמתו תחלש, שכן הצופה באזורים שמחוץ לליקוי המלא רואה חלק מהשמש. זוהי בדיוק תופעת הפרלקסה. שינוי מקומו של הצופה גורם לכך שבאזור מסוים הירח מסתיר את השמש, ובמרחק של כמה מאות ק"מ משם הוא משנה את מיקומו ביחס לשמש ואינו מסתיר אותה עוד.

ב. מדידת פרלקסה ארצית

הבסיס הראשון למדידות פרלקטיות הוא כדה"א. המרחק המרבי בין שתי נקודות על פני כדה"א שווה לקוטרו של כדה"א -כ- 12,800 ק"מ. כאשר רמת הדיוק במדידות הגיעה לכדי דקת קשת אחת, כפי שהיה בסוף המאה ה- 16, ניתן היה להגיע למדידת מרחק באורך:

$$L = \frac{d}{\theta(deg)} \times 57.3 = \frac{12800}{1} \times 57.3 \times 60 = 44{,}006{,}400 \text{ km}$$

מרחק זה גדול לאין שעור ממרחקים המוכרים לנו מחיי היומיום, והוא השפיע על הערכת גודלה של מערכת השמש. שיפור המדידות עם המצאת הטלסקופ אפשר דיוקים גבוהים יותר. לקראת סוף המאה ה- 18 ניתן היה לבצע מדידות ברמת דיוק של שנית קשת אחת בלבד, דבר ששיפר את המדידות הארציות פי 60, כלומר ניתן היה להגיע למדידות

ארציות עד כדי 2.6 מיליארד ק״מ. זוהי דרגת דיוק גבוהה למדיי. על פני הארץ היא מאפשרת למדוד מרחק של 1 ס״מ ממרחק כ- 2 ק״מ. אם מפנים אותה לכיוון מערכת השמש, ניתן להגיע בעזרתה למדידות מדויקות של המרחק עד פלנטת אורנוס. אך כיצד ניתן היה להגיע למדידת מרחקים גדולים יותר?
המעבר מגישה גאוצנטרית לגישה הליוצנטרית שינה את מרחק הייחוס או את קו הבסיס שעליו מבוצעת הפרלקסה. בסיס המדידה גדל מ- 12,800 ק״מ ל- 150,000,000 ק״מ. הערכת גודלו של היקום לא יכולה הייתה להתאפשר ללא השגת שליטה בגישה הפרלקטית הארצית, שאפשרה מעבר אל הדרגה הבאה, מדידה הנשענת על קוטר מסלול כדה״א סביב השמש.

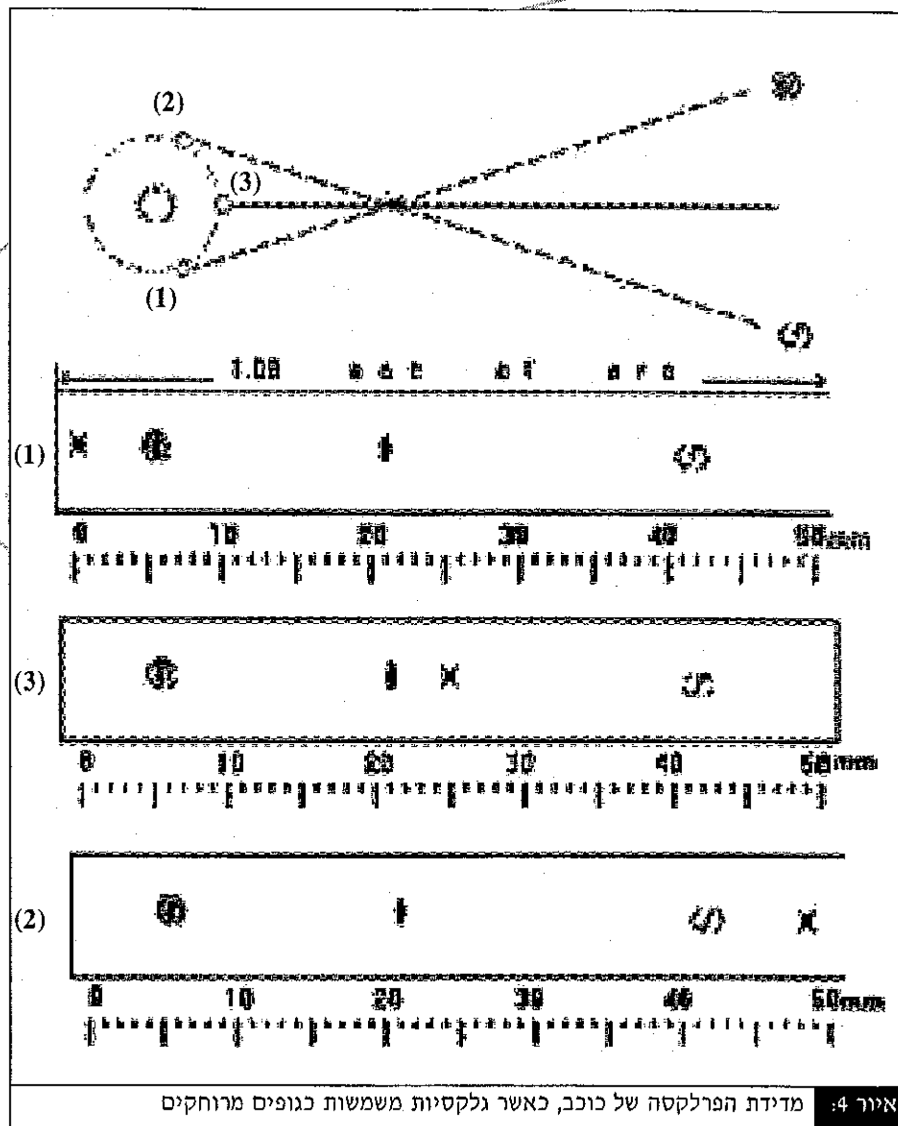
ג. מדידת פרלקסה בעזרת מסלול התנועה של כדה״א סביב השמש

הירח הוא גרם שמים הקרוב ביותר שעליו נוסתה שיטת הפרלקסה הגאוצנטרית. אך כדי למדוד מרחקים של כוכבים יש לבחור בקו ייחוס גדול הרבה יותר. הדבר אפשרי כאשר עוברים אל התפיסה ההליוצנטרית. כדה״א סובב סביב השמש במסלול שרדיוסו כ- 150 מיליון ק״מ. כלומר אם נמדוד את המרחק המרבי בין שני מקומות לאורך המסלול של כדה״א סביב השמש, נקבל שהוא שווה לקוטר המסלול, כלומר כ-300 מיליון ק״מ, בכך הגדלנו המרחק, שאותו נוכל למדוד פי 25,000 בהשוואה למרחק שניתן היה למדוד כאשר כדה״א היה הבסיס למדידה פרלקטית, בלי שהשתנתה רמת הדיוק הזוויתית. בתנאים אלה ניתן להגיע למדידה של כ-66,000 מיליארד ק״מ, כאשר רמת הדיוק היא שנית קשת אחת. מרחק זה שווה בקירוב ל-6.6 שנות אור. נמצאים במרחק זה מכדה״א רק כוכבים בודדים.

כדי להגדיל את טווח המדידה יש צורך לשפר את רמת הדיוק במדידות הזוויתיות. כלומר להגיע לדיוק של חלקי שנית קשת. כיום גבול המדידה הפרלקטית הוא בין אלפית ל-10,000/1 שנית קשת. כלומר ניתן להגיע למדידת מרחקים, שהם בין 5,000 ל-50,000 שנות אור. בתחום זה נמצאים מאות אלפי כוכבים, והדבר מאפשר מדידת המרחק ומיפוי תלת-ממדי של אוכלוסיית כוכבים זו. מרחקים אלה הם מסדר-גודל של ממדי גלקסיית שביל החלב.

כיצד נראית תנועתם של כוכבים, כאשר צופים מהם ממסלול התנועה של כדה״א סביב השמש? באיור הבא ניתן לראות את השינוי של מיקומם היחסי של כוכבים בהשוואה לשתי גלקסיות מרוחקות. תנועת הכוכב במקרה זה היא הרמונית, בעלת זמן מחזור של שנה אחת.
באיור ניתן להבחין בשינוי המיקום של הכוכב בהשוואה לרקע, כאשר צופים בו משלוש נקודות שונות על פני המסלול. ניתן להעריך שפרק-הזמן שחלף בין מדידה אחת לשנייה היה כחודשיים.

בתצלום מוצגות שתי נקודות ראות בשלושה זמנים. בתרשים העליון מוצגת נקודת ראות חיצונית למערכת השמש, הנמצאת מעל מישור הסיבוב של כדה״א סביב השמש. הכוכב שאליו אנו צופים נמצא במישור הסיבוב של כדה״א. במצב [1] הכוכב הקרוב נמצא בסמוך לגלקסיה ספירלית. במצב [3] הכוכב נמצא בסמוך לגלקסיה אליפטית. במצב [2] הכוכב נמצא בסמוך לגלקסיית-מוט.



איור 4: מדידת הפרלקסה של כוכב, כאשר גלקסיות משמשות כגופים מרוחקים

ד. סקלת המרחקים האסטרונומית

נניח שיצאנו לשוטט בחלל והגענו אל מרחק שממנו נראה הרדיוס של מסלול סיבוב הארץ סביב השמש בגודל של שנית קשת אחת. משמעות הדבר היא שהמרחק של הכוכב כדה״א גדול פי 206,265 (בקירוב) מרדיוס כדה״א. לפי הקשר

$$L = \frac{d}{\theta(deg)} \times 57.3 = \frac{R}{1''} \times 57.3 \times 3600 = 206{,}265 \times R$$

רדיוס המסלול השווה בקרוב ל-150 מיליון ק״מ נקרא גם יחידה אסטרונומית (AU). לכן הנקודה שבה אנו נמצאים בחלל, מרוחקת מאתנו 206,265 יחידות אסטרונומיות. מרחק זה ידוע גם בשם פארסק **(parsec = parallax second)**, כלומר תזוזה פרלקטית של שנית קשת אחת. מרחק של 1 פארסק שווה בקירוב ל- 13 10 *3 שהם כ-3.26 שנות אור. כוכב הנמצא במרחק 1 פארסק יבצע תזוזה פרלקטית של שנית קשת אחת, כאשר הארץ חגה במסלולה סביב השמש. נזכור כי הכוכב הקרוב ביותר לשמש, אלפא סנטאורי, מבצע פרלקסה הקטנה משנית קשת, רק ״0.76, לכן מרחקו מאתנו הוא:

$$D\,(pc) = 1 / 0.76'' = 1.3 \text{ parsec}$$

או:

$$D\,(ly) = 3.26 \times D\,(pc) = 4.3 \text{ ly}$$

תשובות לשאלות הרחבה

1. זהו תרגיל פשוט הבודק את התרגול של נוסחת הפרלקסה. במקרה זה אנו מתבקשים למצוא את השינוי הפרלקטי של נוגה, כאשר המרחק בין הצופים הוא 10,000 ק״מ. הצבה בנוסחת הפרלקסה נותנת:

$$\theta = \frac{10{,}000}{40{,}000{,}000} \times 57.3 = 0.0143^{0} = 0.858'$$

2. מטרת תרגיל זה לבחון את הגודל שבו בדרך-כלל מתבצעות מדידות פרלקטיות. גודל של שנית קשת אינו מוכר לתלמיד מניסיונו היומיומי. שנית קשת היא בדרך-כלל גודל גדול מדיי למדידות אסטרונומיות, אך כפתיחה לעולם זהו שלב חשוב.

$$L = \frac{d}{\theta(deg)} \times 57.3 = \frac{10{,}000}{1''} \times 57.3 \times 3600 = 206{,}265 \times 10{,}000 \cong 2 \times 10^{9} \text{ km}$$

3. שאלה זו באה לבחון את גבול המדידה הפרלקטית. נחשב את הפרלקסה של פלוטו על-ידי הצבה בנוסחת הפרלקסה ונקבל:

$$\theta = \frac{10{,}000}{6{,}000{,}000{,}000} \times 57.3 = 9.55 \times 10^{-5\,\circ} = 0.00573' = 0.3438''$$

כלומר בתחום רמת המדידה של השאלה, כמאית שנית קשת, עדיין ניתן למדוד את הפרלקסה של פלוטו. כיום בעזרת מדידות מחוץ לכדה״א ניתן להגיע לדיוק גבוה יותר עד כדי 1/10,000 של שנית קשת.

4. קו הבסיס שבו מודדים את המרחק אל כוכבים הוא הקוטר של מסלול כדה״א סביב השמש. קו הבסיס שכדה״א מספק מוגבל לקוטרו. בעזרת קו בסיס זה וברמת הדיוק הנתונה בשאלה הקודמת ניתן להגיע למדידה של גרמי שמים המרוחקים עד כדי 200 שעות אור (או 200 מיליארד ק״מ). כאשר מדובר בגרמי שמים המרותקים מרחק של שנות אור מאתנו, יש לקבוע קו בסיס אחר, שאותו כאמור מספק לנו היקום ההליוצנטרי.

5. זהו תרגיל ידוע שנועד להבהיר את גודלה של אמת-המידה האסטרונומית המקובלת.

$$1 \text{ שנת אור} = C \times t = 300{,}000 \times (3600 \times 24 \times 365) = 9.46 \times 10^{12}\ \text{km}$$

6. כאשר עוסקים במדידת מרחק כוכבים ובסיס המדידה הוא רדיוס כדה"א, אמת-המידה הטבעית היא הפארסק. יחידת מדידה זו מתקבלת על-ידי שני גדלים אופייניים: גודל קו הבסיס וגודל זווית הפרלקסה. הצבה בנוסחת הפרלקסה נותנת:

$$L = \frac{d}{\theta} \times 57.3 = \frac{1.5 \times 10^{8}}{1''} \times 57.3 \times 3600 = 206{,}265 \times 1.5 \times 10^{8} \cong 3 \times 10^{13}\ \text{km} = 3.26\ \text{ly}$$

7. בהתאם לנתוני השאלה ניתן להגיע למדידה של מרחקים הגדולים פי אלף מהמרחק שמצאנו בשאלה הקודמת, כלומר לאלף פארסק או ל-3,260 שנות אור.

8. סקלת המרחקים בחלל נמדדת במרחבים של גלקסיית שביל החלב במאות אלפי שנות אור, ובמרחבים הבין-גלקטיים היא מגיעה למוליארדי שנות אור. כדי לבצע מדידות בתחומים אלה נקבעו "נרות תקניים" המשתנים בהתאם למרחק שאותו מבקשים למדוד. הנרות התקניים הפשוטים ביותר הם כוכבים הדומים לשמש. מאחר שכמות האנרגיה שפולטת השמש ידועה היטב, וכן ידועים היטב המאפיינים של ספקטרום השמש, ניתן לזהות בקלות יחסית כוכבים הדומים לשמש. מדידה של הספק הקרינה המגיע לכדה"א והשוואתו להספק הקרינה של השמש מאפשרות לנו לקבוע את מרחק הכוכב בהתאם לחוק, הקובע את הקשר בין ירידת עוצמת הקרינה של מקור אור נקודתי ביחס למרחק:

$$I \ \alpha \ \frac{1}{R^2}$$

כאשר מדובר בהשוואה בין כוכב לבין השמש הרי שניתן לקבוע כי:

$$\frac{I_{\text{שמש}}}{I^*} = \frac{R^{*2}}{R^2_{\text{שמש}}}$$

מכאן ש:

$$R^* = R_{\text{שמש}} \times \sqrt{\frac{I_{\text{שמש}}}{I^*}}$$

כלומר, מידיעת עוצמת ההארה של השמש (שמש) I, ושל הכוכב (* I) וכן מידיעת המרחק לשמש (שמש) R, ניתן לקבוע את המרחק אל הכוכב (* R). כוכבים מסוגים שונים זכו להיות "נרות תקניים". ככל שההספק שלהם **(luminosity)** גבוה יותר, כך ניתן להבחין בהם במרחקים גדולים יותר.

כדי למדוד את מרחקן של גלקסיות קרובות משתמשים בכוכבים משתנים מסוגים שונים, החל בכוכבים משתנים מסוג קפאידים **(Cepheus)**, שניתן לקבוע את הספקם בהתאם לזמן המחזור שלהם. "נרות תקניים" אחרים הם סופר-נובות, כוכבים המתפרצים בעוצמה גבוהה, ובשיא ההתפרצות הספקם מגיע עד כדי פי 100,000 מהספקם המקורי. כלומר, ניתן לקבוע בעזרתם מרחקים הגדולים פי 300 לערך ממרחקים של כוכבים בודדים. כאשר מבקשים לקבוע מרחקים גדולים עוד יותר, ניתן להשתמש ב"נרות תקניים" שהם צברי-כוכבים, אזורים מאירים של אבק בין-כוכבי, ובהמשך כאשר מנסים להעריך את ממדי היקום, גלקסיות משמשות כ"נרות תקניים".

פעילות 8: מדידת גודל זוויתי

מבוא

גודל זוויתי הוא מושג של אמצע, מצב שבו ניתן להגיד משהו על גוף, אך עדיין רב הנסתר בו על הגלוי. זהו מושג שבו אנחנו מנסים להגדיר את המרחב הזוויתי, שתופס גוף במקרים רבים, בלי שנוכל לומר משהו על גודלו או על המרחק שהוא נמצא מאתנו. לעתים זוהי התחלה טובה בדרך לגילוי פרטים נוספים, מעין קצה חוט במלאכת הבילוש אחרי הנסתרות של מרחבי הארץ והשמים. בתצפית טלסקופית, כשאיננו מצוידים במכשור ובידע רב, כל שנוכל לראות הוא את הגודל הזוויתי של גרמי שמים.

בפעילות שלפנינו חמישה חלקים, ובסיומה נמדוד את הגודל הזוויתי של השמש. מאחר שהמושג חמקמק משהו, הרבינו בתרגול ובחזרות. אך אין צורך לבצע את כל המטלות, ואפילו לא את כל החלקים כדי להגיע למטרה הסופית של מדידת הגודל הזוויתי של השמש. בחלק מהמקרים ניתן להחליף פעילות תלמידים בהרצאה קצרה של המורה. אך יש לזכור שאם יש פנאי, אנו מאמינים שעבודה של תלמידים עם עצמם מניבה בדרך כלל למידה משמעותית, בעוד שברוב המקרים הרצאה מותירה את התלמידים פאסיביים.

חלקי הפעילות הם:

מה דעתך? - 15 דקות.

חלק א - היכרות עם גודל זוויתי - 10 דקות.

חלק ב - הזרת כמד גודל זוויתי - 15 דקות.

חלק ג - הגודל הזוויתי, כלי למדידת מרחקים - 25 דקות.

חלק ד - מדידת הגודל הזוויתי של השמש - 25 דקות.

דיון מסכם - 10 דקות.

מה דעתך?

לאורך דורות סברו הקדמונים כי כל כוכבי השמים נמצאים על קליפה כדורית אחת, כלומר הם נמצאים במרחק אחד מאתנו, שוכני כדה"א. היקום היה עשוי, לשיטתם, משני כדורים. הכדור הקטן כדה"א, הנמצא במרכז הכדור הגדול - כדור הכוכבים. תפיסה זו אופיינית לרבים מתלמידינו. "מה דעתך" מאפשר להם לבחון עמדה זו, להציגה לדיון ולבדוק אם הם מוכנים לוותר עליה.

השלב הראשון ב"מה דעתך" הוא אישי, ובו מתבקשים התלמידים לענות על שלוש השאלות הראשונות. נציג בקצרה פתרונות אפשריים:

1. הסדר הנכון הוא א. מטאוריט (תופעה אטמוספרית) ב. ירח ג. שמש ד. פלנטת מאדים (לעתים קרובה מהשמש, לעתים רחוקה יותר מהשמש) ה. שביט (בדרך-כלל רחוק הרבה יותר מהשמש, לפרקים קצרים הוא עשוי להתקרב יותר מהשמש) ו. כוכב הצפון.

2. א. מטאוריט - תופעה שבה שרידי אבק של שביטים חודרים אל אטמוספרת כדה"א, כתוצאה מהחיכוך הם מגיעים לטמפרטורות גבוהות. לעיני הצופים בהם הם נראים כרצועת אור המבהיקה בשמים לפרק-זמן קצר. התופעה מתרחשת בערך בגובה 100 ק"מ מעל פני כדה"א.

ב. ירח - מקיף את כדה"א במרחק של כ- 400,000 ק"מ.

ג. השמש - כדה"א מקיף את השמש במרחק ממוצע השווה ל- 150 מיליון ק"מ.

ד. פלנטת מאדים - חגה סביב השמש במרחק של כ- 228 מיליון ק"מ. מאחר שכדה"א חג סביב השמש במרחק של 150 מיליון ק"מ, הרי שפלנטה זו מתקרבת אל כדה"א עד כדי 78 מיליון ק"מ, ומתרחקת ממנו עד כדי מרחק של 278 מיליון ק"מ. כלומר לא ניתן לקבוע מראש אם היא רחוקה או קרובה יותר מהשמש. אך במשך מרבית הזמן פלנטת מאדים רחוקה יותר מהשמש.

3. התשובה לכך היא הבדל המרחקים. יש לזכור כי מרחק השמש מאתנו גדול פי 375 לערך.

4. שלב שבו משווים התלמידים את תשובותיהם ומתכוננים לקראת דיון בכיתה. הדיון בכיתה יציג הערכות שונות של התלמידים תוך הבהרה עד כמה קשה להעריך מרחקים בחלל, בלי שיש לנו מידע נוסף. למעשה, מרבית התלמידים היודעים לסדר בסדר נכון את המרחק לגרמי שמים, מתקשים להסביר כיצד ניתן למדוד המרחקים אליהם. מפתח להבנת השפעת המרחק הוא בהכרת הגודל הזוויתי.

חלק א: גודל זוויתי - מפתח להערכת מרחקים בארץ ובעולם

המטרה העיקרית של חלק זה היא להכיר בדרך התנסותית את המושג גודל זוויתי. הדרך שבה נבחן את העניין תהיה בעזרת מטבע של חצי שקל שקוטרו 25 מ"מ. רצוי להתחיל את השיעור בבקשה מהתלמידים להחזיק מטבע כזה מול עין פקוחה, כשהעין השנייה עצומה. יש להרחיק את המטבע ולקרב אותו הלוך וחזור תוך תשומת-לב:

1. לגודל היחסי של המטבע
2. לשטח שהוא מכסה מקיר הכיתה, כאשר הוא קרוב לעין, וכאשר הוא רחוק ממנה.

השאלה הגדולה היא מדוע יש שינוי בגודל הנראה של המטבע - שהוא הגודל הזוויתי, כאשר מרחיקים את המטבע, בעוד שהגודל הפיזי שלה אינו משתנה. הדגמה זו מאפשרת לבצע הבחנה בין גודל פיזי לבין גודל זוויתי.

נסקור בקצרה את הסעיפים בחלק זה:

א. הירח הוא תופעה מוכרת לתלמידים, יחד עם זאת הגודל הזוויתי שלו אינו מוכר להם בצורה כמותית. ההתרשמות האישית יכולה להיות שונה מאוד בין תלמידים. הגודל הזוויתי של הירח הוא 0.5 מעלה לערך.

קוטר המטבע הוא 2.5 ס"מ. כדי שהוא יתפוס 0.5 מעלה, יש להרחיק אותו עד כדי 286 ס"מ. מרחק זה עשוי להפתיע רבים מתלמידים, הסבורים שהגודל הזוויתי של הירח גדול הרבה יותר. בשלב זה, כמובן, חשוב שהתלמידים ירשמו את עמדתם ללא החלפת דעות עם שכניהם.

ב. ההשוואה עם השכנים נועדה לברר עד כמה הערכות במרבית המקרים שונות זו מזו. שכן ההתרשמות מגודלו הזוויתי של הירח שונה מאדם לאדם.

ג. היחס בין הגודל הזוויתי לבין מרחק המטבע מהצופה הוא יחס הפוך. ככל שהמטבע מרוחק מהצופה, כך גודלו הזוויתי קטן יותר. בזוויות קטנות מתקיים הקשר

57 * (המרחק מהמטבע / קוטר המטבע) = הגודל הזוויתי (מעלות)

בסיכום הפעילות יש לבקש מהתלמידים להציג את עמדותיהם לגבי המרחק, שבו יש להציב את המטבע כדי שגודלו הזוויתי ישווה לזה של הירח. לאחר הצגת עמדות התלמידים ניתן לפעול בכמה דרכים:

1. אם הירח נמצא בשמים בזמן השיעור, יש לצאת החוצה ולבחון את הגודל הזוויתי של הירח מול מרחק המטבע.
2. לבקש מהתלמידים להשוות את הגודל הזוויתי של הירח לגודל הזווית של מטבע כאשר הוא נמצא במרחק מתאים, במרווח שבין השיעור הנוכחי לשיעור הבא.
3. להציג את הפתרון כפי שהוא מופיע בשאלה א.

חלק ב: הזרת כמד גודל זוויתי

כדי להפוך את הגודל הזוויתי למושג נוח לשימוש רצוי להסתייע בשיטת מדידה נוחה של גודל זוויתי. קצה הזרת הוא מכשיר נוח ההולך עמנו לכל מקום, ובעצימת עין והרמת זרת ניתן להעריך בקלות את הגודל הזוויתי של עצמים רבים, קרובים ורחוקים. זהו סעיף יישומי המאפשר להגיע אל השלב של מדידת הגודל הזוויתי של השמש.

א. לאחר ההתנסות עם המטבע והערכת גודל זוויתי של חצי מעלה התלמידים מתבקשים להעריך את הגודל הזוויתי של אצבעם. הגודל הזוויתי של קצה הזרת משתנה בין תלמידים, והוא תלוי ברוחב הזרת ובאורך הזרוע. אצל מרבית התלמידים הגודל הזוויתי של קצה הזרת נמצא בין 1 מעלה לבין 1.5 מעלה.

ב. הגולגולת אינה בעלת צורה עגולה, אלא אליפטית. מדידת קוטר הראש תיעשה על-ידי הנחת סרגל על החלק העליון של הראש ומדידת המרחק שבין האוזניים. מתברר כי המוח האנושי המפואר כלוא בקופסה שממדיה בין 20-15 ס"מ.

ג. ביצוע חלק זה של הפעילות דורש יציאה לפרוזדור או לחצר, שבה ניתן להתרחק עד 20 מטרים. רצוי שלפני השיעור יסמן המורה את המרחקים שמהם יימדד הגודל הזוויתי של הראש. בהשתלמות מורים התקבלו התוצאות הבאות:

מספר מדידה	מרחק (מטרים)	גודל זוויתי של הראש (בזרתות)
1	5	9
2	10	4
3	15	3
4	20	2

טבלה 1: תוצאות המדידה של הגודל הזוויתי של ראש אדם ביחס למרחק

ד. מעיון בתוצאות טבלה 1 מתקבל הרושם, שקיים יחס הפוך בין הגודל הזוויתי (בזרתות) לבין המרחק מהעצם הנמדד. השוואה בין הגודל הזוויתי של המטבע לבין זה של הראש מבהיר שכאשר שני גופים בעלי גודל שונה נמצאים במרחק שונה, יהיה הגוף הגדול יותר בעל הגודל הזוויתי הגדול יותר. כלומר הגודל הזוויתי עומד ביחס ישר לגודל הגוף. ניתן לסכם מסקנות אלה בעזרת הביטוי: (מרחק הגוף מהצופה/ גודל הגוף) α הגודל הזוויתי.

ה. אורך אופייני של זרוע נע בין 45 ל-65 ס״מ. רוחב אופייני של זרת נע בין 1 ל-1.8 ס״מ. נניח לצורך התרגיל כי רוחב הזרת הוא 1.5 ס״מ ואורך הזרוע 55 ס״מ.

ו. נציב בביטוי ונקבל:

1.55^0 = 57 x (1.5 / 55) = 57 x (אורך הזרוע / רוחב הזרת) = הגודל הזוויתי של קצה הזרת.

ז. זוהי שאלת הבהרה לרעיון שדנו בו בסעיף ד.

ח. בין חובבי האסטרונומיה נוהגים להתייחס אל אגרוף קמוץ כיחידה מדידה, שגודלה שווה לעשר מעלות בערך. נבחן הנחה זו בעזרת מדידה כמותית. רוחב אגרוף קמוץ אופייני לכל אדם. במקרה זה נבחר מורה שרוחב אגרופו הוא 11 ס״מ, כלומר אגרופו רחב פי 7.3 מרוחב הזרת. לכן ניתן להסיק שהוא מכסה זווית שגודלה מעלות 11.3 = 7.3 x 1.55, כאשר זרועו פשוטה עד סופה. כלומר ההנחה שהאגרוף מכסה כ-10 מעלות נכונה ברמת דיוק של כ-10%.

חלק ג: הגודל הזוויתי, כלי למדידת מרחקים

חלק זה נועד בעיקר להפנמה ולתרגול של המשתנים המרכיבים את הגודל הזוויתי. בחלק זה ניתן לתרגל מציאת מרחקים של גופים, שהגודל הזוויתי שלהם ידוע והממדים שלהם ידועים. שיטה זו להערכת מרחקים מקובלת מאוד על-ידי מטיילים ואנשי צבא כמו גם על-ידי מדענים. בחלק זה מספר רב של שאלות ותרגילים, ואין צורך לעבור על כולם.

א. בשאלה זאת נתונים:

1,200 מטר = המרחק מהבניין

1.2 מעלות = גודל זוויתי של הזרת

צ״ל: רוחב הבניין

בעזרת שינוי נוסחה והצבת הנתונים נקבל:

25.26 מטרים = 57 / (1200 x 1.2) = 57 / (מרחק מהבניין x גודל זוויתי) = רוחב הבניין

ב. בשאלה זו ובדוגמאות הבאות נעסוק בשני כדורים, שקוטר האחד 4 ס״מ (כדור פינג-פונג) וקוטר השני 10 ס״מ (כדור טניס).

1. הכדור הקטן גדול פי שלושה מרוחב הזרת. אם הזרת במרחק של אורך זרוע (נניח 55 ס״מ) היא בגודל זוויתי השווה 1.2 מעלה, הרי שכדי שכדור זה יהיה בגודל של מעלת קשת אחת יש להרחיקו למרחק הגדול למעלה מפי שלושה מאורך הזרוע. ניחוש אפשרי הוא שני מטרים בקירוב.

2. חישוב של המרחק ייתן

2.28 מטרים = 57 x (4 / 1) = 57 x (גודל זוויתי / קוטר הכדור) = מרחק הכדור הקטן

ג. 1. יחס הגדלים במקרה שלנו הוא 1:2.5
2. הגודל הזוויתי של הכדור הגדול הוא בהתאם ליחס בין הכדורים, כלומר 2.5 מעלות.

ד. כדי להגיע לגודל זוויתי של מעלה אחת עבור הכדור הגדול יש להרחיקו למרחק שהוא פי 2.5 מהמרחק של הכדור הקטן, כלומר למרחק של שישה מטרים בקירוב או 5.7 מטרים בדיוק.

ה. סעיף זה נועד לחזק את ההתנסות בהשפעת מרחקים על הגודל הזוויתי. אם אכן נקפיד על הצבת הכדורים במרחקים הפרופורציוניים לקוטרם, יהיה הגודל הזוויתי שלהם דומה.

ו. כפי שנוכחנו קודם לכן בהפתעה מסוימת, הגודל הזוויתי של המטבע צריך להיות של 0.5 מעלות, ומרחק אז צריך להיות 286 ס"מ מעין הצופה.

חלק ד: מדידת הגודל הזוויתי של השמש

מטרת חלק זה של הפעילות למדוד את הגודל הזוויתי של השמש. לשם כך זו יש להצטייד בזכוכית רתכים או ב"משקפי שמש" מתאימים המסופקים על-ידי חברת "קיטו מרום". פרטים על הזמנת הציוד מופיעים בנספח ג של החוברת לתלמיד. יש לחזור ולהדגיש שאין להסתכל בשמש אלא באמצעי הגנה מתאימים כדי למנוע נזק בלתי הפיך.

א. יחס גודל-מרחק מאפשר לנו לחשב את הגודל הזוויתי של השמש לפי הביטוי:

0.52 מעלות = 57 x (110 / 1) = 57 x (יחס גודל מרחק) = גודל זוויתי של השמש

ב. זכוכית רתכים או "משקפי שמש" של "קיטו מרום" יתאימו לפעילות זו.

ג. השמש מכסה רק כמחצית רוחב הזרת.

ד. מתוצאות שנרשמו בסעיף ג ניתן להסיק שהרוחב הזוויתי שלה הוא כחצי מעלה.

שיעורי בית סיכום הפעילות

1. הערכת הגודל הזוויתי של מכתש מתקבלת, כאשר מוצאים את היחס בינו לבין קוטר הירח. במקרה זה היחס הוא:

15.55 = 225 / 3500 = (רוחב מכתב / קוטר ירח) = יחס קוטר ירח רוחב מכתש

לכן הגודל הזוויתי של המכתש הוא:

0.032^0 = 15.55 / 0.5 = יחס קוטר ירח רוחב מכתש / הגודל הזוויתי של הירח = הגודל הזוויתי של המכתש

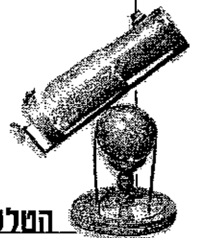
2. א. המרחק = 50 מטרים. קוטר הכדור = 0.3 מטר, לכן הגודל הזוויתי יהיה:

0.342 מעלות = 57 x (50 / 0.3) = 57 x (המרחק לשער / קוטר הכדור) = הגודל הזוויתי של הכדור

3. השמש נראית מהארץ בגודל זוויתי השווה ל-0.5 מעלה או 30 דקות. לכן ממרחק הגדול פי 30 יהיה הגודל הזוויתי שלה רק 1 דקה. מקובל לחשוב שכושר ההפרדה של אדם בעל ראייה טובה הוא 1 דקה. זוהי גם דרגת הדיוק שאליה הגיע טיכו ברהיי בתצפיותיו האסטרונומיות. כלומר השמש תיראה עבור צופה מנפטון כגוף נקודתי, גם לצופה בעל ראייה טובה. בכל מקרה כדאי לבדוק את כושר ההפרדה של התלמידים, ואת זאת נעשה בפעילות הבאה.

פרק ה': הטלסקופ





מבוא

ארבע הפעילויות המרכיבות פרק זה מאפשרות לבצע מסע מחשבתי וניסיוני. עד ימיו של גלילאו (1642-1564) התבססה האסטרונומיה על תצפיות בגרמי השמים ללא הסתייעות במכשור אופטי. המעבר מתצפיות בעין בלבד לתצפיות בעזרת טלסקופ היווה מהפכה בשלושה תחומים: הדרך שבה אוסף האדם נתונים על היקום, הדרך שבה הוא מפענח את הנתונים שאסף, הדרך שבה הוא מפרש את מקומו ביחס ליקום. ארבע הפעילויות בפרק זה מנסות לאפשר לתלמיד ללכת בדרכו של גלילאו ולחוות את המעבר מעין אל הטלסקופ תוך הכרת המגבלות והיתרונות של כל אחד מהם.

הפעילות הראשונה בפרק (פעילות 9) עורכת היכרות עם מגבלות העין האנושית ומפגישה את התלמיד עם מושג כושר ההפרדה. הפעילות השנייה (פעילות 10) עוסקת בקבלת דמות בעזרת שפופרת חריר, התמודדות עם מושג הדמות מול מושג העצם וקבלת דמות שונה מזו שאנו רגילים לקבל בעזרת מראה או עדשה. הפעילות השלישית (פעילות 11) מהווה שיא של הפרק - התלמיד לומד לבנות טלסקופ ולבצע בו תצפיות. הפעילות הרביעית (פעילות 12) מפגישה את התלמיד עם מגבלות הטלסקופ כמכשיר אופטי ומאפשרת השוואה בין הטלסקופ לבין העין.

אי-אפשר לתאר את התפתחות האסטרונומיה ללא הבנה של התפתחות הטלסקופ. השתנותן של תיאוריות מדעיות העוסקות במבנה היקום תלוי בשיפור הטכנולוגיה הקשורה לטלסקופ, כגון: הגדלת העדשה או המראה המרכזית, שיפור מערכת העקיבה, התמודדות עם עיוותים וכדי. בפרק זה נתאר את היסטוריה של התפתחות הטלסקופ.

במפגש עם תלמידים ומורים התברר כי תפיסת תפקיד הטלסקופ באסטרונומיה והבנת עקרון פעולתו כרוכות בתפיסות שגויות ובחוסר ידע. תכונותיו העיקריות של הטלסקופ הן: כושר איסוף אור, כושר הפרדה, שדה ראייה והגדלה. בעיני ציבור רחב מאוד של לומדים, תלמידים ומורים הטלסקופ נתפס ככלי, שתפקידו העיקרי הוא הגדלה. יש להניח שעמדה זו מתבססת על התנסות במשקפות ארציות. מאחר שאין למרבית התלמידים ניסיון בתצפיות אסטרונומיות, הם אינם ערים לעובדה, שהגדלה אינה משמעותית כאשר מדובר בתצפית בכוכבים. דמותו של כוכב (פרט לשמש, כמובן) נשארת נקודתית בכל הגדלה זוויתית המושגת בטלסקופים אופטיים. כלומר, ההגדלה של דמות הכוכב אינה מוסיפה מידע לצופה. הגדלת הטלסקופ חשובה רק כאשר מביטים בעצמים לא נקודתיים כמו פלנטות במערכת השמש או ערפיליות גזיות.

תפיסה שגויה נוספת היא בתחום העבודה בטלסקופ. התשובה הרווחת ביותר על השאלה "מה האסטרונום עושה בטלסקופ?" היא: "צופה בכוכבים". האפשרות שבטלסקופ מבוצעות מדידות, עולה אצל חלק קטן מהלומדים כאשר מדובר על תלמידים. ניתן להעריך שמקורה של עמדה זו נובע מכמה סיבות: ראשית, מרביתם לא ראו מעולם אסטרונום בשעת עבודתו. שנית, בדרך-כלל המפגש של תלמידים, אם היה כזה, הוא עם טלסקופ של חובבים המיועד בעיקר לתצפיות בעין, ללא מכשור. עם זאת בשנים האחרונות רווח יותר ויותר השימוש במצלמות כוכבים מסוג **CCD** המאפשרות מדידה. ושלישית, בפרסומים לטלסקופים בדרך כלל מופיעים ליד הטלסקופ דוגמנים המתבוננים בטלסקופ, אך לא מבצעים מדידות.

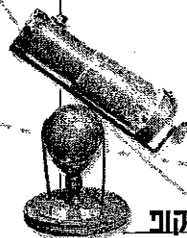
תכנון הזמן לביצוע הפעילויות

פעילות 9: כושר ההפרדה של העין - 45-25 דקות.

פעילות 10: שפופרת חריר - 60-45 דקות.

פעילות 11: בניית טלסקופ אסטרונומי - 60-45 דקות.

פעילות 12: תכונות הטלסקופ - 45 דקות.



פעילות 9: כושר ההפרדה של העין

המסע להיכרות עם הטלסקופ מתחיל בהיכרות עם העין האנושית והאישית של כל תלמיד. העין היא מכשיר מופלא, שהדיון בדרך עבודתה ובשילוב שבינה לבין המוח חורג מתחום הדיון בספר זה. אך חשוב לעמוד על מגבלותיה כדי להבין את היתרונות שמקנה הטלסקופ. זוהי פעילות קצרה המאפשר לצאת למסע אל שולי היקום. היכולת להבחין בפרטי עצם שאליו מביטים, מאפשרת לתהות על קנקנו. בפעילות זו בודק התלמיד את יכולת ההפרדה של עיניו. מטרת הפעילות היא היכרות עם המונח והבנתו.

מה דעתך?

השאלות המוצגות בסעיף זה מנסות לקשר בין הניסיון היומיומי של התלמיד לבין המושג שהוא עומד לחקור. אם התלמידים מהססים לגבי שאלות אלה, רצוי לעודד אותם לנחש. חשוב מאוד לצאת עם עמדת פתיחה למסע זה. בשלב זה המורה אינו תורם משלו דבר, אלא מבקש מהתלמידים להביע את עמדתם. בתחילה בדרך אישית, בכתב. לאחר מכן בדיון קבוצתי קצר. שלב זה נחתם בדיון כיתתי, שבו מועלות השערות שונות והנמקות להן.

1. מהו קוטר המכתש הקטן ביותר בירח שתצליח לראות?

קוטר הירח הוא 3,476 ק״מ, והוא נראה מכדה״א בזווית של 0.5 מעלות בקירוב (30 דק׳).
מקובל להתייחס אל זווית הראייה הקטנה ביותר של בני-אדם כאל דקה קשת אחת לערך. לפי נתון זה, הגודל המינימלי שניתן להבחין בו על הירח יהיה:

$$1/30 \times 3476 = 115.86 \text{ km}$$

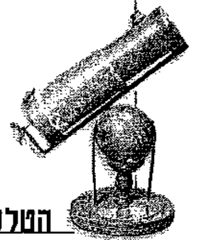
2. מאיזה מרחק ייראו לך שני הפנסים הקדמיים של מכונית כאילו הם נקודת אור בודדת?

לדוגמה, כושר ההפרדה של התלמיד כ-3,000:1. נניח כי המרחק בין שני פנסי מכונית הוא 1.10 מ׳. חישוב המרחק אל המכונית (Y) ייעשה בעזרת שוויון בין היחסים:

$$\frac{3000}{1} = \frac{Y}{1.10}$$

מכאן שהתשובה היא 3,300 מטרים. כלומר ממרחק גדול מ-3.3 ק״מ ייראו פנסי המכונית כנקודת אור אחת.

יש לחתום את שלב ״מה דעתך?״ בדיון כיתתי קצר, שבו יישמעו עמדות הפתיחה של התלמידים ויסוכמו על-ידי המורה.



מהלך הפעילות

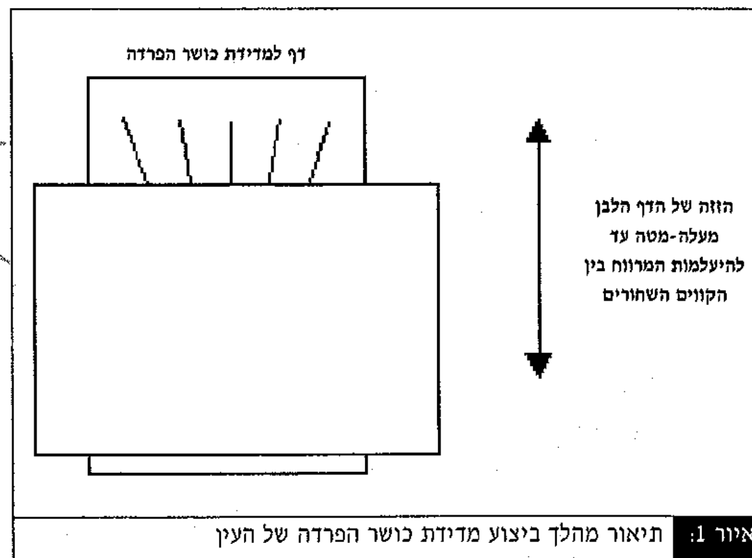
ביצוע פעילות זו צריך להיעשות בחדר-כיתה גדול דיו. רצוי שאורך החדר יהיה כעשרה מטרים. במקרה של חדרים קטנים יותר רצוי לחפש מסדרון, ובו לבצע את הפעילות. רצוי לצלם את הדף המופיע בעמוד 76 כמספר תלמידי הכיתה. בנוסף לדף הפעילות, יש לחלק לכל תלמיד דף לבן שבו יסתיר את דף מדידת כושר ההפרדה. פעילות זו כרוכה בתקשורת מרחוק. לפני תחילת הפעילות בתדריך שניתן לתלמידים רצוי להדגיש את הנקודות הבאות:

א. העבודה נעשית בזוגות.

ב. כל אחד מבני-הזוג עומד בקצה הכיתה או המסדרון.

ג. בסדר שקבעו מראש תלמיד אחד מודד לבן-זוגו את כושר ההפרדה, ולאחר מכן מתחלפים.

ד. תהליך המדידה נעשה כמתואר באיור 1:



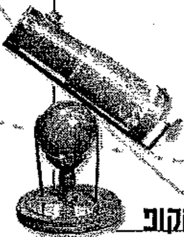
איור 1: תיאור מהלך ביצוע מדידת כושר הפרדה של העין

ה. במקום לצעוק מקצה אחד של הכיתה לקצה השני יש לפתח שפת סימנים פשוטה המכילה שלושה סימנים: הורד, הרם, עצור - זהו גבול כושר ההפרדה של עיני.

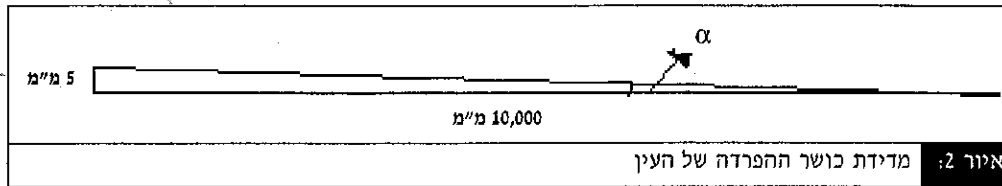
ו. החלק הראשון של הפעילות מסתיים כאשר כל תלמיד רושם את המרווח המינימלי שהוא מבחין בו ממרחק של כעשרה מטרים.

ז. בהתאם לזמן שנותר ניתן לבחון את השפעת תנאי התאורה על כושר ההפרדה וכן את השפעת המשקפיים (אצל מרכיבי משקפיים) על כושר ההפרדה.

כושר ההפרדה מוגדר כ - $1/\alpha$, כאשר היא הזווית המינימלית (מחושבת ברדיאנים) הניתנת לראייה.



בדוגמה התלמידה רוני מסתכלת ממרחק 10,000 מ״מ ומבחינה בקווים שהמרחק ביניהם 5 מ״מ



איור 2: מדידת כושר ההפרדה של העין

$$\frac{5}{10,000} = \text{tg}\,\alpha \approx \alpha$$

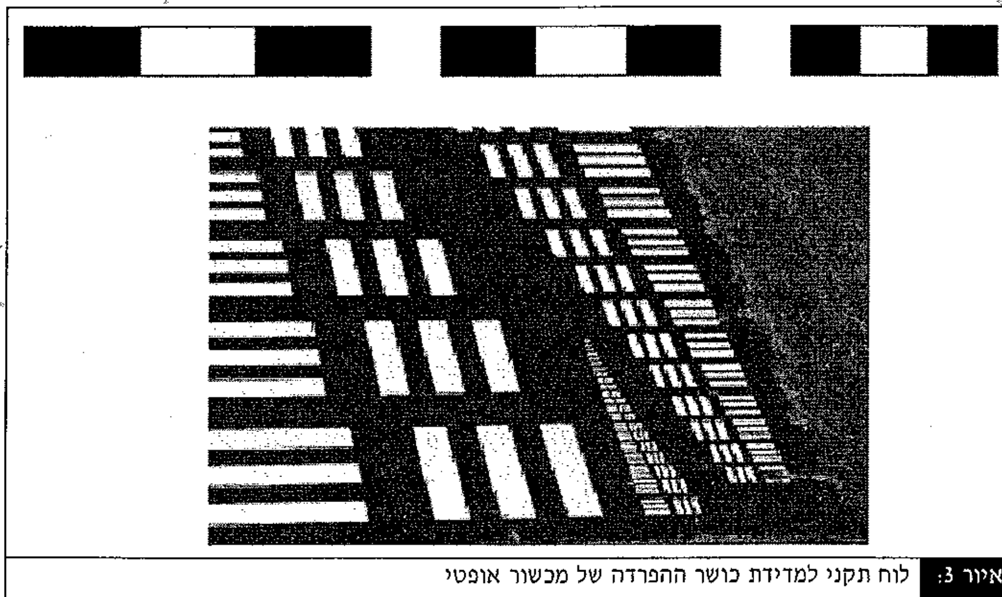
כושר ההפרדה הוא $1/\alpha$ לכן יחושב לפי:

10,000 : 5 = 2000:1

דרך נוספת לביצוע הפעילות

תלו על לוח הכיתה סרגל באורך מטר. התלמידים יתבקשו לבדוק את המרחק המקסימלי שממנו ניתן להבחין ב-1 מ״מ. כדי לאפשר להם למדוד את המרחק המדויק יש למתוח על הרצפה סרט מדידה, מהלוח עד לקצה הנגדי של הכיתה. התלמידים יתבקשו לנוע, להתקרב ולהתרחק מהלוח, תוך התבוננות בסרגל. כאשר יגיעו לנקודה שבה לא יצליחו להפריד עוד בין שתי שנתות סמוכות (מ״מ) על הסרגל התלוי על הלוח, יהיה עליהם למדוד את המרחק מהלוח. היחס בין המרחק מהלוח ל-1 מ״מ בו מציין את כושר ההפרדה של העין.

ניתן להסתייע גם בתרשימים כדוגמת התרשימים באיור 3. יש להדביקם על הלוח ולבצע את המדידות בעזרתם.



איור 3: לוח תקני למדידת כושר ההפרדה של מכשור אופטי



דיון מסכם

לאחר שכל תלמיד חישב את כושר ההפרדה של עיניו, רצוי לחזור ולענות על שאלות "מה דעתך?" עליו לחשב את קוטר המכתש של הירח לפי הנתון האישי שלו.

לדוגמה: כושר ההפרדה של התלמיד 3,000:1 והירח נמצא במרחק ממוצע של 384,400 ק"מ.

$$\frac{384400}{X} = \frac{3000}{1}$$

לכן קוטר המכתש הקטן ביותר שתלמיד זה יוכל לראות הוא: 128 ק"מ.

רצוי לאסוף על הלוח חישובים של מספר תלמידים ולדון בהשפעת כושר ההפרדה על היכולת להבחין בפרטים. ניתן גם להתייחס בדיון לשאלה איך ניתן לשפר את היכולת להבחין בפרטים של עצמים מרוחקים.

תנאי התאורה משפיעים על כושר ההפרדה. ידועה התופעה של הקושי להבחין בפרטים בשעות הבוקר המוקדמות או בשעות שלאחר השקיעה. יש להניח שתופעות אלה יזכו לאישור כמותי של התלמידים. כושר ההפרדה יורד ככל שהכיתה אפלה יותר. מרכיב נוסף המקשה את כושר ההפרדה הוא הניגודיות שבין העצם שאותו רוצים לחקור לבין הרקע. כאשר הפסים מודפסים בצבע צהוב, קשה יותר להבחין ביניהם בהשוואה לניגודיות הקיימת בין הצבע השחור ללבן. מרכיב נוסף הזוכה להתעניינות אצל חלק מהתלמידים הוא המשקפיים. תלמידים ממושקפים מתעניינים בדבר השפעת המשקפיים על כושר ההפרדה. ניתן לבדוק השפעה זו רק אם מתעוררות אצלם מוכנות וסקרנות.

שאלות לדיון מסכם:

1. מהו המרחק המינימלי שצריך להיות בין הפסים, כך שרוני עדיין תבחין ביניהם, אם מרחקה מהם הוא 2,000 ס"מ?

החישוב ייעשה על-ידי השוואה בין יחס כושר ההפרדה לבין הנתונים לגבי הפנסים:

$$\frac{2,000}{1} = \frac{2,000}{X}$$

חילוץ הנעלם X מראה שהמרחק המינימלי בין הפנסים שבו תבחין רוני, הוא 1 ס"מ.

2. מהו המרחק המינימלי שצריך להיות בין הפסים, כך שרוני עדיין תבחין ביניהם, אם מרחקה מהם הוא 3,400 ק"מ.

הפתרון נעשה בדרך דומה לשאלה הקודמת.

תשובה: 1.7 ק"מ



3. כושר ההפרדה של מערכת אופטית בחללית המקיפה את כדה"א בגובה 240 ק"מ הוא 4,500,000/1. נניח כי החללית מצלמת שיירת משאיות. על גגותיהן של המשאיות רשומים מספרי זיהוי. מהו המרחק המינימלי המפריד בין הספרות הרשומות על גג המשאיות, המאפשר לקרוא אותן בעזרת מערכת הראייה של החללית?

הצבת הנתונים במשוואת היחסים נותנת:

$$\frac{4,500,000}{1} = \frac{24,000,000\ cm}{X}$$

תשובה: 5.3 ס"מ

4. מרחק כוכב-הלכת נפטון מהשמש גדול פי 30 ממרחק כדה"א מהשמש. השתמש ביחס מרחק גודל של עיניך, וקבע אם מנפטון נראית השמש כדיסקת אור או כנקודת אור. קוטר השמש הוא 1.4 מיליון ק"מ.

תשובה: נשתמש בכושר ההפרדה של רוני לצורך החישוב.

כושר ההפרדה של רוני: 2000/1.

בעומדה על נפטון מרחקה מן השמש הוא 30 * 150,000,000 ק"מ.

נסמן ב-Y את אורך האובייקט שאותו תוכל רוני לראות ממרחק זה

$$\frac{2,000}{1} = \frac{30 \times 150,000,000}{Y}$$

מכאן שהמרחק המינימלי שבו תבחין רוני הוא:

$$y = 2,250,000\ km$$

ממרחק 30 יחידות אסטרונומיות רוני אינה מבחינה בעצמים קטנים מ-2.25 מיליון ק"מ. קוטר השמש הוא רק 1.4 מיליון ק"מ, והוא קטן מהגודל שרוני יכולה להבחין בו. לכן רוני תראה את השמש כנקודת אור.



פעילות 10: שפופרת חריר

מבוא

התלמיד הנפגש בפעם הראשונה עם דמות של שפופרת חריר, עומד מופתע. "כיצד מחיסור אור מתקבלת דמות?" פעולת שפופרת החריר ביחס לאור דומה לפעולת הפסל על האבן. בחרנו להתחיל את ההיכרות עם שפופרת החריר כמבוא לפעילות הטלסקופ. יש לכך מספר טעמים: שפופרת החריר תהיה הבסיס עליו ייבנה הטלסקופ. התמודדות עם קבלת דמות היא נושא מורכב שנדון רבות באופטיקה, וניתן לגוון אותו על-ידי הצגת הדמות בשפופרת חריר. בהקשר לכך רצוי לקרוא את הנספח בהרחבה הפיזיקלית הדן בשאלה: מה בין דמות עדשה לדמות המתקבלת בשפופרת חריר? יש להניח שהבעיות שבהן ייתקל התלמיד בקבלת הדמות בשפופרת חריר, יובילו אותו אל הפתרון המתקבל בעזרת עדשות.

יתרונה של שפופרת החריר הוא ביכולת לקבל דמות בכל מרחק: גודל הדמות תלוי רק ביחסי המרחקים: חריר- עצם, חריר-מסך. שתי הבעיות המרכזיות בעבודה עם שפופרת חריר:

א. הדמות המתקבלת אינה די בהירה. ניסיון לפתור בעיה זו על-ידי הגדלת החריר מעורר בעיה אחרת: עם הגדלת החריר הדמות הולכת ומאבדת מחדותה. מעבר גודל מסוים של חריר הדמות תהיה מטושטשת, וקשה יהיה לזהות את העצם שיצר אותה.

ב. יש קושי בהגדלת הדמות של עצם מרוחק. יחס ההגדלה בשפופרת חריר הוא כיחס אורך השפופרת למרחק שבין השפופרת לעצם. יחס זה הוא זעיר ביותר, כאשר מדובר בעצמים רחוקים. מאחר שלא ניתן להתקרב אל עצמים רחוקים, תתקבל דמותם זעירה ביותר.

מה דעתך?!

ההנחה בשאלת "מה דעתך?" המופיעה בסעיף זה, היא שהתלמידים כבר נפגשו עם דמות המתקבלת בעזרת חריר בפעילות 4, העוסקת במדידת קוטר השמש. אך אם זו הפעם הראשונה שהם נפגשים בנושא זה, ניתן לשנות את השאלה ובמקום לבדוק מה קורה בשני נקבים זעירים, לבחון מה יקרה כאשר בנייר האלומיניום יהיה רק נקב זעיר אחד.

תשובות התלמידים לשאלה על נקב זעיר אחד הן מהסוג:

א. יתקבל כתם אור בדומה לצורת הנקב.

ב. לא נראה דבר ברור, אלא אזור בהיר יותר.

ג. נראה אלומה בדומה לאור שמש הנכנס דרך חור בווילון.

רוב התלמידים מניחים שהצבת חריר בדרכו של האור, שמקורו בחוט הלהט, ייצור על המשך כתם אור שצורתו כצורת החריר. קבלת דמות היא עבורם הפתעה מרתקת.



אם התלמידים כבר התנסו בדמות המתקבלת על-ידי חריר, הרי שאלת שני הנקבים מהווה אתגר, ובהתאם לכך הרי מספר התשובות שקיבלנו:

א. יתקבל כתם גדול בהיר.
ב. יתקבלו שני כתמים בהירים, שאחד חופף את השני ומרכזם אזור בהיר יותר.
ג. נראה שתי נקודות אור.
ד. יופיעו שתי דמויות של העצם.
ה. תופיע דמות אחת של העצם, אך בהירה יותר מאשר הדמות המתקבלת מחריר בודד.

בדומה לפעילויות הקודמות חשוב מאוד לאחר השלב האישי לקיים שלב, שבו מתקיים דיון בקבוצה, ועולים רעיונות שונים של חברי הצוות. בדיון הכיתתי יסוכמו עמדות התלמידים וההנמקות לעמדות אלה.

מהלך הפעילות

הפעילות מורכבת משלושה חלקים:

א. בניית שפופרת חריר מטרתה היכרות עם דמות המתקבלת בעזרת חריר.
ב. מדידה מרוק של גודל בעזרת שפופרת חריר מטרתה היכרות היחסים שבין גודל עצם/ גודל הדמות לבין המרחק חריר-עצם/חריר-דמות.
ג. תכונות הדמות שמתקבל בעזרת שפופרת חריר בפעילות זו נבחנות שלוש תכונות: חדות, גודל, בהירות.

פעילות א הכרחית לצורך המעבר אל הפעילויות הבאות. רצוי לא לוותר על שתי הפעילויות הבאות. אך אם הזמן דוחק, ניתן לוותר על חלק ב, שהוא בעל אופי מתמטי יותר, ולהתמקד בחלק ג שהוא בעל אופי איכותי.

חלק א: בניית שפופרת חריר

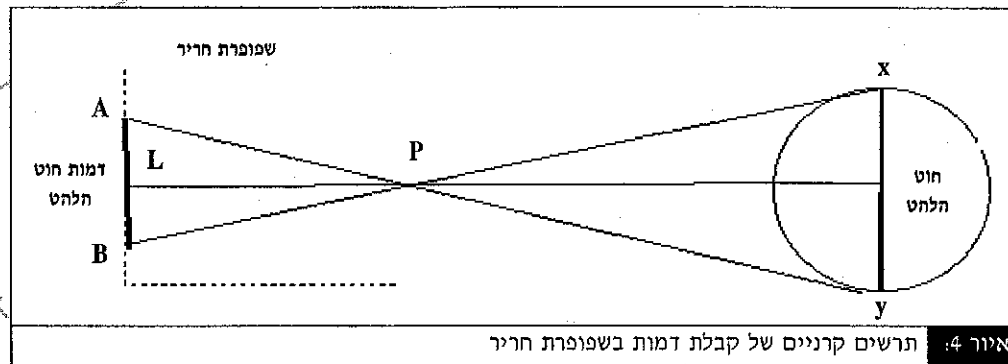
מטרת הפעילות לבנות מכשיר פשוט, שבאמצעותו יוכל התלמיד לקבל דמות מעצמים שונים ולמדוד את גודלם. ההוראות לבניית השפופרת פשוטות, ובדרך-כלל לא נצפו בעיות בשלב זה. מפאת מחירם של זוג הגלילים, שהם הבסיס לטלסקופ פשוט, ניתן לחלקם לקבוצות של שניים-שלושה תלמידים. התלהבות רבה קיימת כאשר מצליחים לקבל את דמות הנורה.

ניתן לעצור את הפעילות ולקיים דיון קצר סביב השאלה: מדוע התקבלה דמות בניגוד למרבית הציפיות שלנו בשלב "מה דעתך"? לפני סיכום הדיון על-ידי מורה רצוי לבקש מהתלמידים להציג את עמדותיהם בעזרת תרשים קרניים.



חלק ב: מדידה מרחוק של גודל בעזרת שפופרת חריר

העבודה עם שפופרת חריר מאפשרת ליישם את חוקי האופטיקה הגאומטרית בדרך פשוטה של דמיון משולשים. מתברר שהיחסים בין משולשים דומים פועלים היטב ביחס קשרים שבין גודל הדמות לגודל העצם. באיור 4 מופיעים שני משולשים דומים **ABP** ו-**XYP**. יחס הבסיסים במשולשים אלה הוא כיחס הגבהים. משולשים אלה מייצגים גדלים פיזיקליים. הבסיסים מייצגים את העצם ואת דמותו, והגבהים את המרחק עצם-חריר ואת אורך השפופרת.



איור 4: תרשים קרניים של קבלת דמות בשפופרת חריר

מדמיון משולשים **XYP** ו-**PAB**, נובע כי:

$$\frac{XY}{D} = \frac{AB}{L}$$

מכאן נגזרת שיטה למדידת אורך חוט להט של נורה, כאשר לא ניתן למדוד אותה בדרך ישירה. לחלופין אם ידוע גודל העצם ולא ידוע המרחק אליו, ניתן בעזרת דמיון משולשים זה להעריך את המרחק.

בסיום חלק זה ניתן לקיים דיון קצר סביב השאלה כיצד ניתן לנצל את הקשר שגילינו בשפופרת חריר לצורכי אסטרונומיה? הצורך לפתח שיטות למדידה עקיפה של ממדי גופים שב וחוזר במדע בכלל ובאסטרונומיה בפרט. לא אחת עולה הצורך למדוד מרחקים של צבירי כוכבים או גלקסיות, שניתן לשער את ממדיהם, אך לא ידוע המרחק אליהם. עקרונית, שפופרת חריר הייתה עשויה לספק את התשובה, אלא שמגבלותיה מונעות ממנה למלא תפקיד זה באסטרונומיה, כפי שנגלה בחלק הבא.



חלק ג: תכונות הדמות שמתקבלת בעזרת שפופרת חריר

מטרת פעילות זו לברר את מגבלותיה של שפופרת חריר כמכשיר לחקירת גופים רחוקים. במקרה פשוט שבו החריר קטן ואידאלי, מתקבלת דמות חדה אך תיוורת למדיי. כדי לקבל דמות בהירה יותר מגדילים את החריר במטרה לאפשר לכמות אור גדולה יותר להיכנס, הדמות חדות הדמות נפגמת. כלומר, הבהירות מתקבלת "על חשבון" החדות.

שינוי המרחק בין המנורה לחריר:

נענה על השאלות המופיעות בסעיף זה כסדרן.

בדוק כיצד שינוי המרחק בין הנורה לחריר משפיע על גודל הדמות, ושים לב מה קורה גם ליתר המאפיינים שלה:

- גודל הדמות: כאשר מרחיקים את שפופרת החריר מהעצם, דמות העצם קטנה.
- החדות של הדמות: חדות הדמות אינה משתנה, כאשר מרחיקים או מקרבים את שפופרת החריר מחוט הלהט.
- מידת ההארה של הדמות: ככל שמתרחקים ממקור האור עוצמת האור יורדת, לכן כמות האור העוברת דרך החריר קטנה יותר. לכן כאשר המרחק מהנורה גדל, הדמות הולכת ונעשית תיוורת.

סכם לעצמך: כיצד ניתן להגדיל את הדמות המתקבלת על הנייר המילימטרי?

קיימות שתי שיטות להגדיל את הדמות של חוט הלהט:

א. התקרבות עם שפופרת החריר אל העצם.

ב. הגדלת אורכה של שפופרת החריר, כפי שנראה בסעיף הבא.

שינוי אורך השפופרת:

תשובות לשאלות:

הכנס או הוצא את הגליל הפנימי על מנת לשנות את אורך השפופרת. אל תשנה את המרחק בין המנורה לחריר.

ציין כיצד השפיע הדבר על כל אחת מתכונות הדמות:

- החדות של הדמות: לפי התאוריה חדות התמונה אינה צריכה להשתנות, וסביר שזו תהיה התשובה של מרבית הקבוצות. במקרים אחרים דיווחו תלמידים, שהגדילו את אורך השפופרת ע"י הוצאת הגליל הפנימי, שהדמות המתקבלת נראתה פחות חדה. הסיבה לכך היא שהדמות גדלה ועמה גדל אזור שבו קיימת הארה חלקית. תלמידים מצביעים על כך שהתמונה פחות חדה, מפני שהאזור המטושטש נראה יותר גדול.
- גודל הדמות: הגדלת אורך השפופרת גורמת להרחקת הנייר המילימטרי המשמש כמסך. כתוצאה מכך הדמות המתקבלת על המסך גדלה.
- מידת ההארה: כאשר הדמות גדלה היא גם מחווירה, שכן אותה כמות קרניים, שעברו דרך החריר, נפרשות על שטח גדול יותר.



שאלות 1 ו-2 מהוות חזרה על שאלת הפתיחה ונועדו לוודא שאכן הקשר בין היחסים הובהר, כפי שהצגנו אותו בסעיף הקודם. מטרתה של שאלה 3 לעמוד על יתרונה וחסרונה של שפופרת חריר: מצד אחד קבלת דמות חדה בכל אורך, מצד שני דמות חיוורת שבהירותה הולכת וקטנה עם הגדלת אורך השפופרת או הגדלת המרחק מהעצם. יש לזכור שבאסטרונומיה אנו צופים בגרמי שמים רחוקים וחיוורים, לכן יש צירוף של שני חסרונות אלה.

בתשובה לשאלה מה עלינו לעשות כדי להגדיל את בהירות התמונה, מתקבלת באופן קבוע מפי הילדים ההצעה להגדיל את החריר. לכן בחרנו להוסיף את הסעיף הבא ולהעמיד את התלמיד על ה״מחיר״ שגובה שיפור הבהירות, ע״י הגדלת החריר.

ה״מחיר״ שגובה שיפור הבהירות על-ידי הגדלת החריר.

שינוי גודל החריר

תשובות לשאלות:

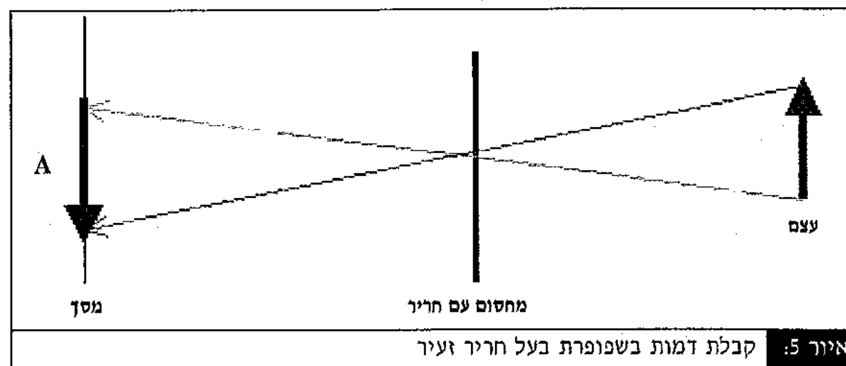
הוסף שני חרירים קטנים בסמוך לחריר הקיים, ותאר מה מתקבל על הנייר המילימטרי.

מתקבלות שתי דמויות חדות של חוט הלהט.

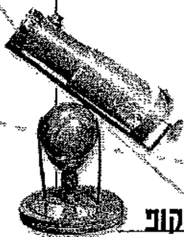
נסה לשער מה נראה על הנייר המילימטרי, אם נחבר את שלושת החרירים לחור אחד גדול יותר: התוצאה תלויה במרחק החרירים זה מזה. אם נוקבו החרירים במרחק של מילימטר או שניים מהחריר הראשון ויצרו משולש קטן, יתאחדו הדמויות שהיו סמוכות זו לזו ונקבל דמות אחת, מטושטשת במידת מה. גודל החריר במקרה זה הוא מילימטרים בודדים. במקרה שהחרירים החדשים נוקבו במרחק של כחצי ס״מ, ונוצר חור שקוטרו 7 מ״מ לערך, תהיה הדמות מטושטשת למדיי, ויתקבל קו מתאר כללי של דמות חוט הלהט.

הגדל את החריר בערך פי שלושה, וציין כיצד השפיעה ההגדלה על כל אחת מתכונות הדמות:

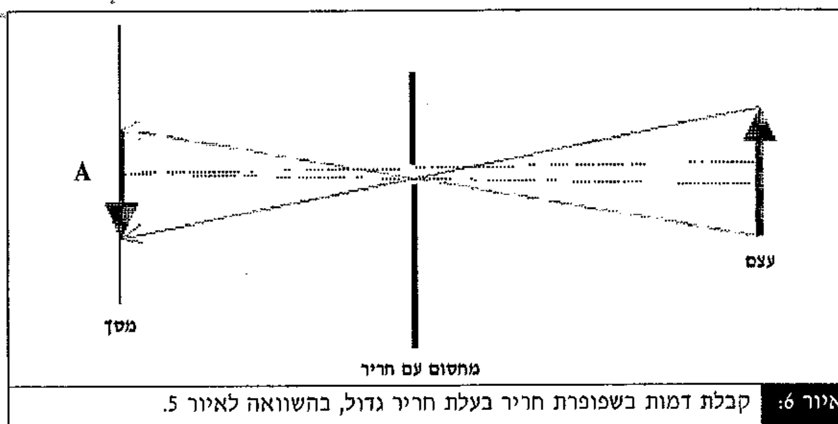
- גודל הדמות: גודל זה אינו משתנה, מכיוון שהוא נקבע ע״י מרחק החריר מהעצםומרחק המסך מהחריר. שולי הדמות, האזור הפחות חד, יגדלו באופן יחסי, אלא אם כן החריר החדש עדיין נקודתי ומספק תמונה חדה.
- מידת ההארה של הדמות: ברור שהדמות בהירה יותר. דרך חור גדול יותר עברו יותר קרני אור.
- חדות הדמות: חדות הדמות ירדה. בחריר מתקבלת חדות הדמות, מפני שכל נקודה על העצם הופכת לנקודה על הדמות. בשל קוטנו החריר מהווה ״מחסום״ לקרניים ״מיותרות״. ראה תרשים:



איור 5: קבלת דמות בשפופרת בעל חריר זעיר



אל הנקודה A בדמות שהתקבלה מגיעות קרניים מנקודה מתאימה על העצם. אם נגדיל את החריר, יגיעו לנקודה A קרניים מנקודות נוספות, על העצם כפי שמסומן בתרשים 6. מעיון בתרשים ניתן לראות שבדרך זו התמונה מאבדת מחדותה.



איור 6: קבלת דמות בשפופרת חריר בעלת חריר גדול, בהשוואה לאיור 5.

1. באיזה מצב מידת ההארה של הדמות גדולה יותר?

הדמות מוארת יותר, כאשר החריר גדול יותר, וכמות האור העוברת דרכו גדלה.

2. מה קורה אז למידת החדות של הדמות?

מידת החדות של הדמות יורדת, היות שאותה נקודה בדמות מייצגת מספר נקודות בעצם. בעוד שבדמות חדה קיימת התאמה בין נקודה בעצם לנקודה בדמות.

שאלות לדיון

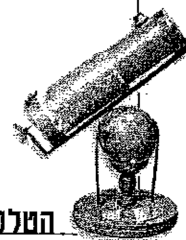
שאלות ותשובות:

1. ***סכם בעזרת תרשים קרניים כיצד מתקבלת הדמות של חוט הלהט בשפופרת חריר.***

באיור 4 מופיע תרשים קרניים העונה על שאלה זו.

2. ***בעזרת שפופרת חריר ניתן למדוד את קוטר הירח; אם נרצה לקבל דמות של הירח בעלת בהירות סבירה, האם החריר צריך להיות גדול ביחס לחריר שבעזרתו מודדים את קוטר השמש, קטן ממנו או שאין חשיבות לגודל החריר?***

כמות האור המגיעה לכדה"א מהירח קטנה מזו המגיעה מהשמש בשישה סדרי-גודל. ההספק האורי המגיע מהשמש לכדה"א הוא מסדר-גודל של 1 וט/סמ"ר, בעוד שמהירח ההספק הוא רק 10^{-6} וט/סמ"ר. כדי להגיע לבהירות דומה היה צורך להגדיל את החריר בערך פי אלף, אך אין צורך להגיע לבהירות כה כגדולה. ניתן להסתפק בחריר שקוטרו שני מ"מ, ועדיין נקבל דמות בהירה דיה.



3. ***נצל את הידע שרכשת במהלך העבודה עם שפופרת חריר כדי למדוד את קוטר הירח. ייתכן שתזדקק לנתונים נוספים, שאותם תוכל להשלים על-ידי פנייה למורה, לספרות מקצועית או לאינטרנט.***

המלץ לתלמיד לבצע מדידה זו באמצע חודש עברי, בערב, לאחר זריחת הירח. בתאריך זה הירח במילואו, והדמות שתתקבל ממנו די בהירה. לצורך חישוב קוטר הירח עליו לקבל כנתון את המרחק אל הירח כ-385,000 ק״מ בממוצע.

במדידה זו קיימים שני נעלמים שאותם צריך התלמיד למדוד:

L = אורך השפופרת שאתה עבד התלמיד

AB = קוטר דמות הירח

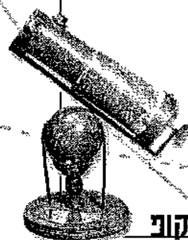
$$\frac{XY}{D} = \frac{AB}{L}$$

רצוי להמליץ לתלמידים למדוד את שניהם במ״מ, כדי להימנע מטעויות בעת חישוב היחס ביניהם. הצבת נתונים אלה בביטוי

שבו עסקנו בחלק השני של הפעילות, ייתן את קוטר הירח. קוטר הירח המופיע בספרות הוא: 3,475 ק״מ. רשום על הלוח את תוצאות המדידות של התלמידים. כדאי לנצל את ההזדמנות לדיון בחישובי שגיאה ובסיבות האפשריות שתרמו לשגיאה זו.

4. ***כיצד תשתנה הדמות אם במקום חריר בצורת עיגול נקבב בדף האלומיניום חריר בצורת מרובע?***

צורת החריר אינה אמורה להשפיע על הדמות שתתקבל, אם החריר די זעיר. השפעת צורת החריר על כתם האור תבוא לידי ביטוי, כאשר החריר הוא מסדר-גודל של אורך השפופרת.



כדי למדוד עוצמת אור מחברים לטלסקופ **פוטומטר פוטואלקטרי**, מכשיר המשמש למדידת כמות האור המגיעה מעצמים אסטרונומיים. הפוטומטר המוצב באזור המוקד של המראה הראשית בטלסקופ, הוא התקן ההופך את האור הנופל עליו לזרם חשמלי המוגבר אלפי מונים בהשוואה לזרם שנוצר מפגיעת האור. עוצמת הזרם פרופורציונית לכמות האור הנופלת על המכשיר. ניתן למדוד את עוצמת האור של עצם אסטרונומי בצבעים שונים. המדידה מבוצעת בשילוב פילטרים המוצבים לפני הפוטומטר ומאפשרים בקירוב ראשון לתאר התפלגות אנרגיה בספקטרום של כוכב. הפילטרים המקובלים באסטרונומיה הם מסוג U,B,V,R,I. תחומי המדידה המקובלים הם: התחום האולטרה סגול (V), הכחול (B), התחום הנראה (V), האדום (R), והאינפרה אדום (I). מערכת פילטרים זו פועלת בתחומים רחבים. קיימת גם מערכת u, b, v, y לתחומים צרים המאפשרת קביעת הרכב כימי של כוכב.

2. ***לאור תשובתך לשאלה 1, שער מהן התכונות החשובות הנדרשות מטלסקופ.***

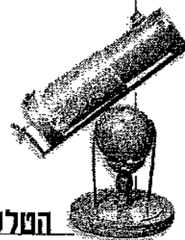
התכונות החשובות של הטלסקופ הן איסוף אור, כושר הפרדה, הגדלה.בתשובה לשאלה 1, פירטנו את תפקידו של הטלסקופ . נקל לשער על-פי התפקיד של המכשור המוצמד לטלסקופ לצורכי צילום, קבלת ספקטרום, מדידת עוצמת אור, כי התכונה החשובה ביותר למילוי תפקיד זה היא **איסוף קרני אור**. חשוב להבטיח את איכות האופטיקה של המערכת. לא די באיסוף האור, אם האור אינו ממוקד ברמה גבוהה.

כושר איסוף אור

עדשת העין מגבילה את שטח איסוף האור בגודלה (5-6 מ״מ בערך), עדשת העצם בטלסקופ גדולה יותר ומאפשרת קליטת חלק גדול יותר מחזית הגל הנפלטת מהכוכב ומגיעה לטלסקופ.עובדה זו מאפשרת יצירת דמות של כוכבים רחוקים וחלשים.

מקובל לייצג את בהירות הכוכב בסקלה הקרויה **גודל נראה**. לפי שיטה זו ככל שהמספר קטן יותר, הוא מייצג בהירות גדולה יותר. לדוגמה, בהירות השמש בסקלה זו היא 26.5-, בהירות הירח המלא היא 12.5-, בהירות צדק בשיא הזוהר היא 2-, בהירותו של הכוכב אלטאיר היא 1.0. גבול הרגישות של העין הוא 6.5, כלומר העין לא תראה כוכב חיוור יותר. קוטר המראה הראשית של הטלסקופ האופטי שבהר פלומר בדרום קליפורניה הוא חמישה מטרים. בעזרתו ניתן לצפות בכוכבים, שהגודל הנראה שלהם הוא 20. עוצמת ההארה של כוכבים אלה קטנה פי מיליון בקירוב בהשוואה ליכולת האנושית.

נתבונן בדוגמה נוספת: קוטר המראה הראשית בטלסקופ האופטי של "פרחי מדע" במכללת עמק הירדן הוא 40 ס״מ. נחשב מהו יחס עוצמות האור שבין כוכב הנצפה בעזרת הטלסקופ לבין אותו כוכב הנצפה בעין. החישוב יתבסס על ההנחה כי כמות האור תלויה בשטח האיסוף. נחשב את היחס בין שטח המראה של הטלסקופ לבין שטח האישון, שדרכו מגיע האור אל העין.



r_1 = רדיוס הטלסקופ 200 מ״מ.
r_2 = רדיוס העין 2.5 מ״מ בתנאי תאורה רגילים.

$$\frac{\pi r^2_1}{\pi r^2_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 = \left(\frac{200}{2.5}\right)^2 = 6{,}400$$

כלומר, בעזרת הטלסקופ האופטי במצפה האופטי של ״פרחי מדע״ ניתן לצפות בכוכבים, הפולטים אור בעוצמה הנמוכה פי 6,400 מהכוכב החלש שניתן לצפות בו בעין.

כושר הפרדה

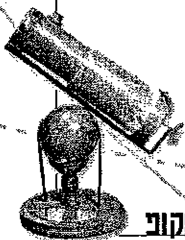
זוהי תכונה המאפיינת את יכולת ההבחנה בפרטים, שהמרחק הזוויתי ביניהם קטן. ככל שהמערכת האופטית של הטלסקופ משופרת, ותנאי הראות טובים יותר, כך גדל כושר ההפרדה של הטלסקופ. דיון מפורט בכושר ההפרדה מופיע בהמשך בהרחבה הפיזיקלית.

הגדלה

כל הכוכבים בשמים (פרט לשמש) הם כה רחוקים מכדה״א, עד כי הגדלת הטלסקופ תשאיר אותם נקודתיים בעיני הצופה. ההגדלה משמשת את האסטרונומים רק בתצפיות בעצמים קרובים כמו ירח ופלנטות או בעצמים גדולים מאוד, כגון צבירי כוכבים או גלקסיות.
ההגדלה היא היחס בין הגודל הזוויתי של הדמות הנוצרת בטלסקופ לבין גודלו הזוויתי של העצם. כאשר צופים בעצמים לא נקודתיים, למשל כוכבי-לכת או ערפיליות גזיות,מתקבלת הגדלה זוויתית של הגודל הנצפה. לדוגמה, קוטר הירח הנראה בעין הוא בגודל זוויתי של כ-0.5 מעלה. בטלסקופ בעל יחס הגדלה של 40 תיראה דמות הירח בגודל זוויתי השווה ל- 20 מעלות.

3. בפעילות קודמת עסקנו בשפופרת חריר. כאשר כיוונו אותה אל נורה, התקבלה באמצעותה דמות של חוט להט. מה יקרה, לדעתך, לדמות חוט הלהט, אם נחליף את דף האלומיניום המחורר שבקצה השפופרת בעדשה מרכזת?

עדשה מרכזת תאסוף כמות רבה יותר של אור ותרכז אותו לנקודת המוקד, ועל כן נקבל דמות בהירה יותר מזו שקיבלנו בעזרת חריר.



1. ***מה ניתן לעשות לדעתך על מנת "ליישר" את הדמות?***

הבעיה של דמות הפוכה הטרידה מאוד אנשים, שצפו בטלסקופ אל עצמים ארציים. כידוע, גלילאו קיבל מלגת קיום לכל ימי חייו מאגודת הסוחרים של ונציה, שעבורם שימש הטלסקופ אמצעי לזיהוי ספינות מתקרבות. כדי לקבל דמות ישרה ניתן להתבונן בדמות המתקבלת בעזרת עדשה מרכזת נוספת, שתהפוך אותה שוב.

2. ***באיזו מידה חשוב "ליישר" את הדמות?***

א. כאשר מדובר בצפייה אל עצם על כדה"א.

כאשר מדובר בצפייה אל עצם על פני כדה"א, יש חשיבות ביישור הדמות. קשה לבני-אדם להתמצא במרחב שבו הם צופים, כאשר הדמויות המתקבלות הפוכות על ראשיהן. בעיה זו מחריפה כאשר מנסים לעבור משדה הראייה של הטלסקופ לראייה ללא טלסקופ.

ב. כאשר מדובר בצפייה בכוכבים.

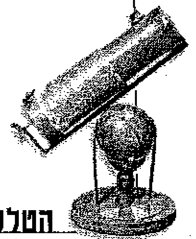
כאשר מדובר בצפייה בכוכבים, אין חשיבות ליישור הדמות בשל הסימטריות של הכוכב ובשל העדר משמעות לכיוון מעלה-מטה. חשוב לזהות את הכיוון שממנו הגיע האור ואת המיקום היחסי של הכוכב במרחב בהשוואה לכוכבים אחרים. עבור פרמטרים אלה כיוון הדמות אינו חשוב.

3. ***נניח שאתה מעוניין להגדיל את הדמות שהתקבלה, מה עליך לעשות?***

על שאלה זו ניתן לענות בכיוונים שונים, שכן כל דמות המתקבלת בעזרת הטלסקופ יכולה להוות עצם למערכת אופטית שתבוא לאחר הטלסקופ. קיימות מערכות אופטיות רבות. אנו נתייחס למערכת האופטית הפשוטה ביותר עדשה בודדת. ניתן להוסיף עדשה מרכזת ולהביט בעזרתה בדמות שהתקבלה. אם נקפיד להתבונן בדמות במרחק מתאים, תוכל עדשה זו לשמש כזכוכית מגדלת.

4. ***כיצד תשפיע, לדעתך, הגדלת הדמות על הפרמטרים הבאים: גודל שדה הראייה, בהירות הדמות, חדות הדמות?***

הגדלת הדמות גוררת עמה מספר קשיים. שדה הראייה קטן, ניתן לראות בו פחות עצמים שהגודל הזוויתי שלהם גדול יותר. זוהי תופעה מוכרת בצילומי תקריב. מאחר שכמות האור נאספת משטח קטן יותר ומפוזרת על שטח גדול יחסית, תקטן בהירות הדמות. באשר לחדות התמונה, הגדלה גוררת בדרך-כלל טשטוש של שולי הדמות. ככל שיחס ההגדלה משתפר, כך יורדת חדות הדמות.



חלק ג: הוספת עדשת עין משפופרת לטלסקופ

מפתיע עד כמה פשוט להבין טלסקופ. למעשה, מוסיפים עדשה שנייה לשפופרת, עדשת העין, ומקבלים טלסקופ עדשות. למרות זאת כדי לפרש נכונה את המרחב המתגלה דרך עדשת הזכוכית הקטנה, יש צורך בחקירה בהתמודדות עם שאלות רבות. תפקיד עדשת העין הוא להגדיל את הדמות המתקבלת, והיא משמשת כזכוכית מגדלת עבור הדמות שנוצרה ע״י עדשת העצם. לא תמיד ניתן לראות מיד בעזרת הטלסקופ. יש להקפיד שעדשת העין תהיה בניצב לציר עדשת העצם. אוחז העדשות הספוגי אינו מבטיח מיקום מדויק של עדשת העין. בעיה אחרת העולה מיד עם תחילת העבודה בטלסקופ היא היציבות. מאחר ששדה הראייה של הטלסקופ קטן, יש לכוונו בדיוק רב אל העצם שבו רוצים לצפות. לעתים גם לאחר שהצליחו התלמידים ללכוד את העצם הרצוי הם מתקשים לייצב את הטלסקופ. כדי להתמודד עם בעיה זו יש להשעין את הטלסקופ על קצה שולחן או על אדן חלון או על כתף של בן-זוג. בדרך זו ניתן לצפות לאורך זמן לכיוון מוגדר במרחב.

הערה לסעיף ב - במטרה למנוע סנוור רצוי להשתמש בנורה בעלת הספק נמוך או בנר. אם מתעוררת בעיית סנוור, ניתן לכוון את הדמות המתקבלת בעינית אל מסך, ולא אל העין, מאז התוצאות על המסך יפות ומספקות.

אנו ממליצים בתוקף לקרוא את ההרחבה הפיזיקלית בדבר מבנה הטלסקופ ועקרונות פעולתו לפני תחילת ביצוע הפעילות, כך שהדבר יסייע בהבנת הנושא וביכולתך לענות על שאלות תלמידים.

תשובות לשאלות בסעיף ב:

1. ***באיזו מידה הדמות חיוורת או בהירה יותר מהדמות, שהתקבלה לפני הוספת עדשת העין?***

הדמות שהתקבלה בהירה יותר. הסיבה העיקרית לכך היא שעדשת העין מצליחה ליצור אלומת אור מקבילה, שקוטרה דומה לקוטר אישון העין. כך רוב האור שנאסף על-ידי עדשת העצם מרוכז על-ידי עדשת העין.

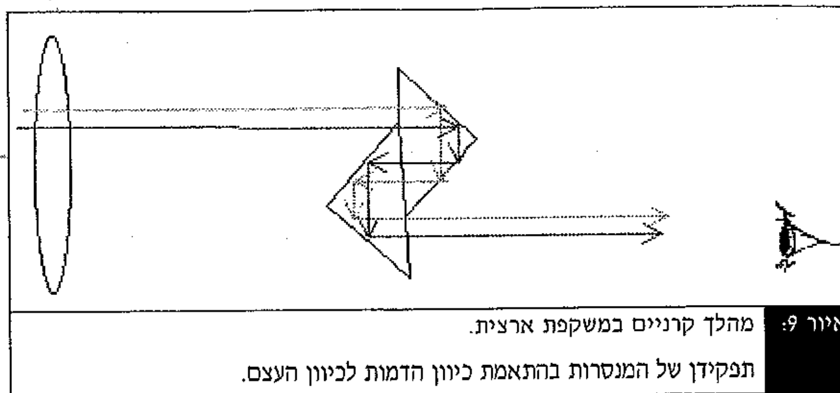
2. ***מהי מידת הקושי שבה ניתן לאתר את הדמות לאחר הוספת העדשה?***

שדה הראייה של הטלסקופ קטן, לכן יש צורך לכוונו בדיוק רב יותר, כדי שנוכל לראות את דמות העצם המבוקש. למעשה, קשה לייצב את הדמות המתקבלת ללא נקודת משען נוחה לידיים.

3. ***האם הוספת עדשת העין השפיעה על כיוון הדמות?***

הדמות שהתקבלה עדיין הפוכה. תלמידים מרבים לשאול על ההבדל בין משקפת ארצית למשקפת אסטרונומית, ואולי פה המקום להזכיר את ההבדל. בטלסקופ אסטרונומי אין חשיבות לכיוון הדמות. לכן אין צורך ב״יישור״ הדמות. לעומת זאת, במשקפת ארצית יש חשיבות רבה לכיווניות של הדמות ביחס לעצם שבו מתבוננים. כדי להתאים את כיוון הדמות לכיוון העצם הופכים את הדמות המתקבלת בעזרת מנסרות זכוכית, ישרות-זווית ושוות-שוקיים. מנסרה ראשונה הופכת ״מעלה-מטה״ ומנסרה שנייה, ניצבת לה, הופכת ״שמאל -ימין״ בעזרת החזרות פנימיות של האור.





איור 9: מהלך קרניים במשקפת ארצית.
תפקידן של המנסרות בהתאמת כיוון הדמות לכיוון העצם.

דיון מסכם בעזרת תרשים
קרניים של הטלסקופ

קיימת התלהבות רבה אצל תלמידים המצליחים ליצור טלסקופ במו ידיהם, ולאחר מכן להציגו בפני חברים ובני משפחה. יש מרחק בין החוויה של התבוננות במכשיר לבין הבנה של דרך פעולתו. מטרת הדיון המסכם היא לקרב את החוויה אל הדיון בחוקי האופטיקה הגאומטרית באמצעות פעולתם של מכשירים אופטיים.

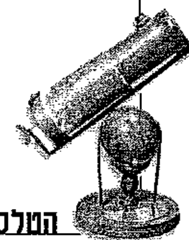
מטרת שאלות 2,1 היא להבהיר את ההבדל בין צפייה בעצמים קרובים לבין צפייה בעצמים רחוקים. ההבדל העיקרי הוא במיקום הדמות: בצפייה בעצם מרוחק מתקבלת הדמות סמוך למישור המוקד, בעוד שבעצם הקרוב לעדשה, בהשוואה למרחק המוקד, הדמות תתקבל הרחק ממישור המוקד. בתרשים נקטנו גישה שלפיה העצם נמצא בצד שמאל של האיור והדמות בצדו הימני, בהתאם לכך באיור 4 הושאר מרחב גדול יותר מהצד השמאלי לצורך ציור העצם.

תפקידה של עדשת העין נדון בהרחבה הפיזיקלית המופיעה בהמשך פרק זה. הדיון קיים תיאור של טלסקופ בעל עדשה אחת, ולאחריו טלסקופ בעל שתי עדשות. באיור 13 בפרק זה ניתן לראות את חשיבות עדשת העין כמרכיב אופטי המסייע באיסוף האור המרוכז על-ידי עדשת העצם.

נסכם את התשובות לשאלות 1-9 בעזרת תיאור הבעיות העיקריות בהפעלת טלסקופ השפופרות ופתרונן:

א. **קבלת דמות** - התסכול הראשון בהפעלת הטלסקופ הוא ביכולת לקבל דמות. הגורם הקובע הוא אורך השפופרת, בהנחה שהעדשות נמצאות במקביל זו לזו ובניצב לציר הטלסקופ. על התלמידים להתאים את אורך השפופרת, כך שיקבלו דמות של העצם שבו הם מבקשים לצפות.

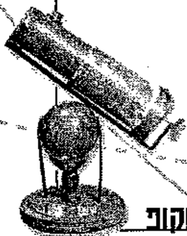
ב. **קבלת דמות מטושטשת** - הסיבות לכך: עדשות פגומות, העדר ציר משותף בין העדשות, אורך השפופרות אינו מותאם למרחקי המוקד. בהתאם לכך יש לבדוק את איכות העדשות, כיוונן בתוך הטלסקופ והתאמת אורך השפופרת לראייה ברורה של הדמות.



ג. **קושי באיתור הדמות** - שדה הראייה הקטן של הטלסקופ מקשה באיתור עצמים. קוטר שדה הראייה של הטלסקופ הוא 1.6 מעלה, בעוד ששדה הראייה שאנו צופים בשתי עינינו הוא כמאתיים מעלות. כלומר על התלמיד להתרגל למעבר משדה ראייה נרחב לשדה מצומצם פי 125 לערך בגודל הזוויתי, או פי 15,000 בגודל הזווית המרחבית. מודעות לשינוי זה ותרגול מתאים יסייעו לאיתור הדמות.

ד. **קושי בייצוב הטלסקופ** - זווית הראייה של הטלסקופ קטנה יחסית לזו של העיניים, וכדי להצליח לראות דמות יש צורך לכוון במדויק אל עבר הדמות. הבעיה היא שאם נחזיק את הטלסקופ בידינו, לאחר זמן קצר יתעייפו הידיים ויתחילו לרעוד, ונתקשה לייצב את הטלסקופ. כדי למנוע את התזוזות רצוי להשעין את הטלסקופ על נקודת משען כגון: קצה שולחן, קצה כיסא, כתף של חבר, אדן חלון, כן מעבדתי וכדי.

ה. **התבוננות בדמות הפוכה** - היכולת להתבונן במרחב הפוך מקשה את ההתמצאות במרחב. תזוזת הטלסקופ לימין לעתים גורמת דווקא לצד השמאלי של הדמות להתגלות. יש צורך לתרגל את המוח במצב החדש לפני שמרגישים בו בנוח.



פעילות 12: תכונות הטלסקופ

מבוא

הפעילות הקודמת אפשרה לתלמיד להכיר את הטלסקופ ולצפות בעזרתו בעצמים ארציים ובגופים שמימיים. במפגש זה נוכח התלמיד לדעת כי גם עבודה בטכנולוגיה פשוטה יחסית של טלסקופ שפופרות דורשת הבנה של החוקיות הקיימת בה. בנוסף לכך חווה התלמיד את מגבלות הטלסקופ. מטרת פעילות זו לעמוד על שלוש תכונות מרכזיות של הטלסקופ:

א. כושר הפרדה - **Resolution**

ב. שדה ראייה.

ג. כושר איסוף אור.

מה דעתך?

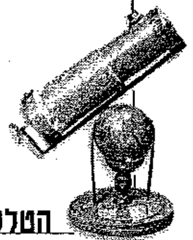
השאלות המופיעות ב"מה דעתך?" נועדו לברר את עמדות הפתיחה של התלמידים לגבי שלוש התכונות שאנו מבקשים לחקור.

1. דמות הכוכב אלפא סנטאורי, כאשר צופים בו בעזרת טלסקופ, היא נקודתית כדמותם של כל כוכבי השמים בשל מרחקם הרב. ממדיו של אלפא סנטאורי כ-5 שניות אור בקירוב, בעוד שהמרחק אליו כ-130 מיליון ק"מ. מכאן שכושר ההפרדה הנדרש הוא מסדר-גודל של מיליונית מעלה או כאלפית שנית קשת - כושר ההפרדה שאליו לא הגיעו עד כה הטלסקופים המתקדמים בעולם. בטלסקופ בעל קוטר מראה ראשית די גדול ניתן לצפות בבן-זוגו החיוור פרוקסימה סנטאורי. עובדה זו אינה מוכרת למרבית התלמידים, הסבורים כי בעזרת טלסקופ ניתן להגדיל את דמותם של כוכבים.

2. הגדלת שטח המראה בטלסקופ מגדילה את כושר איסוף האור של הטלסקופ, ובכך מגדילה את הסיכוי לראות עצמים חיוורים או עצמים מרוחקים. ככל שגדל קוטר הטלסקופים, כך מתרחק אופק היקום שאנו מסוגלים לצפות בו. קוטר זה כיום עומד על כ-15 מיליארד שנות אור. יש להדגיש שהגדלת קוטר הטלסקופ אינה משפרת בדרך-כלל את יכולת ההגדלה שלו.

3. מילת המפתח היא כושר הפרדה. כבר ב-1781 פרסם האסטרונום צרפתי מסייה **(Charles Messier 1730-1817)**, קטלוג הקרוי על שמו, ובו רשימה של 103 גרמי שמים שאינם כוכבים. גרמי שמים אלה נקראו ערפיליות, ולא ניתן היה לדעת בוודאות אם הם נמצאים בתוך שביל החלב או מחוצה לו. רק עם שכלול שיטות מדידת מרחקים מצד אחד, ושכלול הטכנולוגיה מצד שני הצליח אדווין האבל **(Edwin Hubble)** בשנת 1923 לגלות את גלקסיית אנדרומדה, הקרויה גם **M31**, על-פי מספרה בקטלוג מסייה. שילוב של שיפור כושר ההפרדה ומדידת מרחקים הוביל להבנה, ש גלקסיות רבות אחרות שוכנות מחוץ לשביל החלב, והן מורכבות ממיליארדי כוכבים בדומה לגלקסיית הבית שלנו.

כדרכנו, התלמידים יכתבו ראשית את עמדתם, לאחר מכן יתקיים דיון בקבוצות קטנות, ובסיום שלב זה ייערך דיון כיתתי בו יוצגו עמדות התלמידים. בדיון המסכם נשוב ונבחן את עמדות הפתיחה.



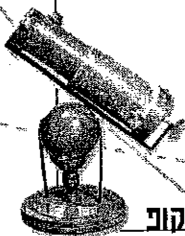
חלק א: כושר ההפרדה של הטלסקופ

דמותו של כוכב אינה נקודתית בטלסקופ בשל עקיפת האור בפתח הטלסקופ (ראה הרחבה פיזיקלית). לכן דמויותיהם של כוכבים במערכת כפולה עלולות להיראות כשתי תבניות עקיפה חופפות, וקשה יהיה להפריד ביניהן. תופעה זו אנלוגית לתופעה הקושי להבחין בשני פנסים של רכב הנמצא רחוק מאתנו. רק כאשר הוא מתקרב דיו, כושר ההפרדה שלנו מאפשר לנו להפריד את כתם האור לשתי דמויות נפרדות. כושר ההפרדה של טלסקופ מוגדר כהופכי של זווית הראייה המינימלית בין שני עצמים, אשר הטלסקופ יוצר מהם דמויות נפרדות.

התלמידים ערכו היכרות עם מושג כושר ההפרדה בפעילות 9 העוסקת בכושר ההפרדה של העין. יש להניח שהמושג "כושר הפרדה" כבר מוכר להם. בפעילות זו התלמיד אינו מודד את כושר ההפרדה המקסימלי של הטלסקופ, כי המדידה מוגבלת על-ידי הפרטים שבהם אנו צופים. לדוגמה, בניסוי נמצא שגודלו של הפרט הקטן ביותר שניתן להבחין בו הוא מ"מ, והוא נמצא במרחק 1 מ"מ מפרט שני דומה לו. נתונים אלה אינם סותרים את האפשרות, שניתן להבחין מאותו מרחק גם בפרטים שגודלם 0.5 מ"מ, והם רחוקים זה מזה מרחק 0.5 מ"מ. לכן נתמקד בכושר ההפרדה הנמדד בטלסקופ בהשוואה לזה של העין במרחק נתון. בטלסקופ גלילי הנייר שבנינו מצאנו, שכושר ההפרדה שלו גדול פי שלושה בקירוב מכושר ההפרדה של העין. בהנחה שקושר ההפרדה של העין הוא בערך 1 דקת קשת, הרי שעם הטלסקופ ניתן להגיע לכושר הפרדה של 20 שניות קשת. זוהי, כאמור, קפיצה שאפשרה לגלילאו לערוך מהפכה גדולה ביחס למרכז היקום וגרמי השמים שבו.

יש לדאוג לכך שתנאי התאורה בחדר יהיו טובים ביותר:

1. כדאי לתלות על לוח מואר סרגל מדידה באורך מטר, כי בסרגלים אלו השנתות מודגשות. בנייר מילימטרי המוצע בספר לתלמיד, המדידה קשה בשל העובדה שהשנתות אינן מודגשות.
2. יש לעמוד במרחק שבין 2-1.5 מטרים מהלוח בדקו את כושר ההפרדה של הטלסקופ, על-ידי חישוב יחס מרחק-גודל. לאחר מכן נעמוד באותו המרחק ללא טלסקופ ונחשב את יחס מרחק-גודל. לצורך זה סמנו על הסרגל נקודות נוספות בעזרת לורדים דקים במרחקים של 3-2 מ"מ ביניהם.
3. אם ברשותכם טלסקופ אחר, רצוי לבדוק גם את כושר ההפרדה שלו. ככל שקוטר המראה/עדשה גדול יותר, גדל כושר ההפרדה של הטלסקופ. תנאי הראות משפיעים גם הם על כושר ההפרדה, ולכן המצפים נבנים במקומות גבוהים ונקיים מזיהום סביבתי. לדוגמה, כושר ההפרדה האופטימלי של הטלסקופ בהר פלומר שקוטרו 5 מטרים הוא כ-0.02 שנית קשת.



חלק ב: מדידת שדה הראייה של הטלסקופ

שדה הראייה הוא מושג שהתלמיד מכיר מלימודיו באופטיקה, לדוגמה שדה ראייה של מראה. הפעם הוא מודד את שדה הראייה של מכשיר אופטי הכולל עדשות. שדה הראייה של הטלסקופ הוא הרוחב הזוויתי שאותו קולט הטלסקופ ואשר מציג תמונה חדה. אמנם הטלסקופ קולט תמונה רחבה יותר, אבל היא אינה ברורה בחלקה. בחלק הלא ברור של התמונה הדמות משתרעת על גודל זוויתי נרחב יותר, ולכן באזור כושר ההפרדה קטן.
תפקיד העינית בטלסקופ **להגדיל את זווית הראייה** של העצם הנצפה, לכן היא מגדילה גם את העיוותים.

הנוסחה לחישוב שדה הראייה המעשי שונה לטלסקופים שונים וחורגת ממסגרת הדיון.
הנוסחה המופיעה בספר לתלמיד מדויקת, כאשר מדברים על טלסקופ הנייר שלנו.

בנתונים שנאספו בהשתלמות מורים התקבלה התוצאה הבאה:
המרחק מהסרגל (L) 890 ס"מ, רוחב שדה הראייה (d) 25 ס"מ. מכאן שהגודל הזוויתי של שדה הראייה הוא:

$$P\ (\text{מעלות}) = (d / L) \times 57 = (25 / 890) \times 57 = 1.60^0$$

תשובות לשאלות הסיכום:

1. ***הגודל הזוויתי של הירח הוא בקירוב חצי מעלה. כאשר תצפו בירח באמצעות הטלסקופ שלכם, האם הירח יהיה קטן יותר משדה הראייה של הטלסקופ שלכם, או גדול ממנו?***
הגודל הזוויתי של הירח 0.5. שדה הראייה של הטלסקופ הוא 1.60^0, לכן הירח ייכנס לשדה הראייה של הטלסקופ.

2. ***נסו להציע שיטה למדידת קוטר מכתשים על פני הירח. יש לזכור שקוטר הירח הוא כ-3,500 ק"מ.***
יש למדוד את הקוטר הזוויתי של המכתש. היחס בין הקוטר הזוויתי של המכתש לקוטר הזוויתי של הירח שווה ליחס בין קוטר המכתש לקוטר הירח.

חלק ג: כושר איסוף האור של הטלסקופ

אחד המכשירים הרגישים ביותר לעוצמת אור הוא אישון העין. תכונה זו של האישון מאפשרת לנו לראות כיצד מתגונן גופנו מפני עוצמת ההארה. האישון זכה לחיקוי מכני המצוי כמעט בכל מצלמה - הצמצם. ניתן לדמיין את מראת הטלסקופ כצמצם הפתוח אל השמיים. ככל שפתח הצמצם גדול יותר, כך ניתן להגדיל את כמות האור שתעבור דרכו בפרק-זמן נתון. חקירת שינוי גודל האישון מצד אחד וגודל שטח העדשה או המראה בטלסקופ מצד שני נותנת הערכה לגבי כושר איסוף האור של הטלסקופ.

במדידות שביצענו בתנאי תאורה טובים, היה קוטר האישון כשלושה מילימטרים, ובתנאי האפלה היה קוטר האישון כשבעה מילימטרים. המדידה נעשית בעזרת סרגלים המונחים בקדמת העין. יש להזהיר את התלמידים לפני ביצוע המדידה לבל יקרבו את הסרגל אל העין. יש להניח את הסרגל מתחת לעין ולמדוד בזהירות. אין לשפר את הדיוק על-ידי סיכון העין.



שטח האישון בתנאי האפלה הוא:

$$S = 3.14 \times R^2 = 3.14 \times 3.5^2 = 38.5\ mm^2 = 0.385\ cm^2$$

קוטר עדשת העצם 4.5 ס״מ, לכן שטח איסוף האור הוא:

$$S = 3.14 \times R2 = 3.14 \times 2.75^2 = 23.7\ cm^2$$

היחס בין שטח העדשה לשטח האישון הוא:

S עדשה / S אישון = 23.7 / 0.385 = 61.6

לכן הטלסקופ שבנינו יכול לאסוף אור מגרם שמים, שעוצמתו חלשה פי 61 לערך מעוצמת גרם השמים החיוור ביותר שנראה בעין בלתי מצוידת.

תשובות לשאלות סיכום:

1. ***איסוף האור בטלסקופ החלל האבל נעשה על-ידי מראה בעלת קוטר 2.4 מטרים. חשבו מהו היחס בין כושר איסוף האור של טלסקופ החלל לבין כושר איסוף האור של העין האנושית.***

קוטר מראת טלסקופ החלל האבל הוא 2.4 מטרים, לכן שטח איסוף האור הוא:

$$S = 3.14 \times R^2 = 3.14 \times 120^2 = 45,216\ cm^2$$

כאשר נשווה אותו לכושר האיסוף האנושי, נקבל שהיחס הוא:

S האבל / S אישון = 45,216 / 0.385 = 117,444

יתרון זה באיסוף האור מאפשר לטלסקופ החלל לצפות בגרמי שמים חיוורים ביותר.

2. ***השווה בין כושר ההפרדה של טלסקופ החלל, כ- 0.05 שניות קשת, לבין כושר ההפרדה של עינך. מהי משמעות היחס הזה, כאשר מדובר בהבחנה בפרטים?***

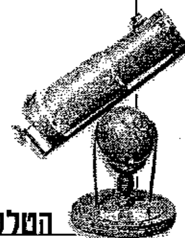
כושר ההפרדה שמדדנו עבור טלסקופ הנייר שלנו היה 20 שניות קשת. מתברר שבעזרת האבל ניתן לראות פרטים בגרמי שמים, שהגודל הזוויתי שלהם פי 400. מכאן שהשיפור בכושר איסוף האור גדול לאין ערוך מהשיפור בכושר ההפרדה.



דיון מסכם

1. ניתן לערוך דיון בתפקידי המסך והעין בראיית **עצמים ותבניות מוארות** (דמות ממשית + העתק שנוצר על-ידי שפופרת חריר).

2. ראיית הדמות המדומה, שהוא תהליך מסובך יותר, תילמד לאחר שהתלמיד יבין מהם התנאים לראייה של "משהו" בעקבות הדיון הנ"ל; כדאי להתחיל בדמויות שמתקבלות במראה מישורית תופעה שכל תלמיד נתקל בה, ולעבור לדמויות מדומות שמתקבלות באמצעים אחרים: מראות כדוריות, זכוכית מגדלת, עומק מדומה שנובע מהבדלי מקדם-שבירה.
בחוקי ההחזרה והשבירה ייתקל התלמיד במקביל ללימוד נושא הדמויות המדומות. החוקים יתקבלו כתוצאה מחקירת תהליך קבלת הדמויות, ולא באמצעות מעקב אחרי מהלך קרני אור, שהמניע לו אינו ברור.



מה בין דמות בעדשה לדמות בשפופרת חריר?

מבוא

מחקרים בהוראת האופטיקה הגאומטרית שבוצעו בשני העשורים האחרונים, מצביעים על כמה קשיים מרכזיים בלמידת הנושא ובהוראתו.

מדובר בעיקר בשאלות הקשורות למושג הדמות: יצירת הדמות וראייתה תפקיד המסך, תפקיד העין ביצירת הדמות המדומה ובראיית הדמות הממשית; האפיון של "דמות ממשית" האם כל מה שרואים על מסך הוא דמות ממשית? מהו התנאי לכך שעין תראה נקודה על עצם קרוב?

מיון תבניות מוארות שמתקבלות על מסך

כדי לטפל בקשיים אלו מציעים פרד גולדברג ושרון בנדל (אוניברסיטת סן-דייגו) ויגאל גלילי (האוניברסיטה העברית, ירושלים) במאמר שהתפרסם באפריל 1991 ב-**Physics Teacher**, לבחון שתי מערכות - לאחת עם עדשה מרכזת, ושנייה עם שפופרת חריר.

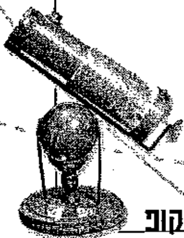
המערכת הראשונה כוללת מנורה, עדשה מרכזת ומסך שקוף למחצה. במערכת השנייה דף מחורר מחליף את העדשה. בכל מקרה רואים על המסך תבנית מוארת, שנראית כמו שעתוק מהופך חד של המנורה. אל תבנית זו יש להתייחס כאל "ההעתק על המסך" של המנורה, ולא כאל "דמות" או "דמות ממשית" מסיבות שיוסברו בהמשך.

במקרה הראשון (עדשה מרכזת):

1. רק כאשר העדשה נמצאת במרחק מסוים מהמסך, ניתן לצפות בשעתוק חד.
2. אם מזיזים את המסך ממקום זה ומביטים לאורך ציר העדשה, ניתן עדיין לראות שעתוק הפוך של המנורה. אנו נתייחס לזה כאל "**השעתוק האווירי**". קיים קושי לעתים למקד את המבט לשעתוק באוויר בלי לדעת מראש על קיומו. בדרך-כלל אנשים ממקדים את מבטם בעדשה, כי זהו האובייקט הממשי הקרוב ביותר. אפשר לתרגל התבוננות אל השעתוק האווירי בדרך-כלל החזרת המסך למיקומו המקורי והסרתו לחלופין. כך ניתן להשתכנע בכך שמיקום השעתוק האווירי ומיקום השעתוק על המסך זהים. לעתים לא רואים את כל השעתוק האווירי בבת-אחת, ניתן אז להזיז קלות את העין ולראות את יתר החלקים שלו.

במקרה השני (שפופרת חריר):

1. שנוי מיקום המסך גורם לשינוי גודל ובהירות של השעתוק, אך הוא נשאר חד והפוך בכל מצב!
2. בניגוד לעדשה, לא ניתן לראות שעתוק אווירי; כאשר מתבוננים לאורך הציר של שפופרת החריר ומסירים את המסך, ניתן לראות רק נקודת אור דרך הנקב.



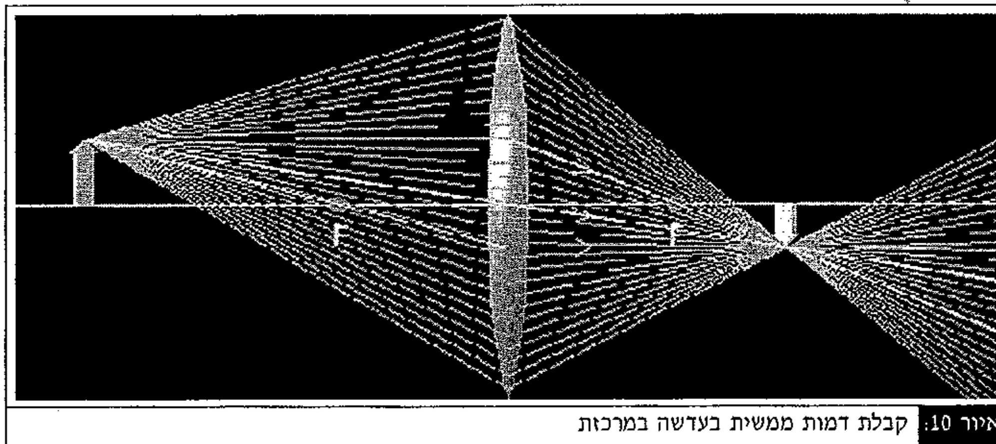
יש לקחת בחשבון שני גורמים כדי להבין את ההבדלים בין שתי המערכות:

1. **התנאי לכך שעין תראה נקודה על עצם קרוב**: שטף של אור מתפזר מאותה נקודה נקודה צריך להיכנס לעין. המערכת קרנית-עדשה תמקד אור זה על הרשתית.
2. **תפקיד המסך**: מסך שקוף למחצה מחזיר ומעביר חלק מהאור לכל הכיוונים. כאשר אור פוגע במסך, כל נקודה משמשת מקור נקודתי של אור שמתפזר לכל הכיוונים. צופה יכול לראות נקודה מאירה זו במסך כמעט מכל מקום, כי העין שלו תקבל חלק מהאור הזה. המסך מאפשר לראות באופן נוח יותר את ההעתק.

האם ניתן להגדיר את מה שנוצר בשני המקרים כדמות ממשית?

נבדוק שני קריטריונים:

1. למיקום מסוים של האובייקט ושל האביזר האופטי מתאים מיקום יחיד של נקודת הדמות הממשית. נקודה זו נמצאת במקום בו מתרכזות קרניים, שיצאו מהאובייקט ועברו דרך האביזר האופטי.
2. ניתן לצפות בדמות ממשית בעין בלי קשר לשאלה אם יש מסך (בגלל קיומה של נקודת ריכוז זו).



איור 10: קבלת דמות ממשית בעדשה במרכזת

השעתוק המתקבל בשפופרת החריר לא עונה על שני הקריטריונים הנ"ל, לכן לא ניתן להגדירו כדמות ממשית. (הבחנה זו חשובה, שכן בשלב הטיפול במושג הדמות המדומה יש נטייה להבחין בינה ובין דמות ממשית לפי "קריטריון המסך". צריך אם כן לנסח את הקריטריון בזהירות ולומר **שמה שלא ניתן** לקבל על מסך הוא דמות מדומה, אולם **לא כל מה שניתן** לקבל על מסך זו דמות ממשית.)



הרחבה פיזיקלית

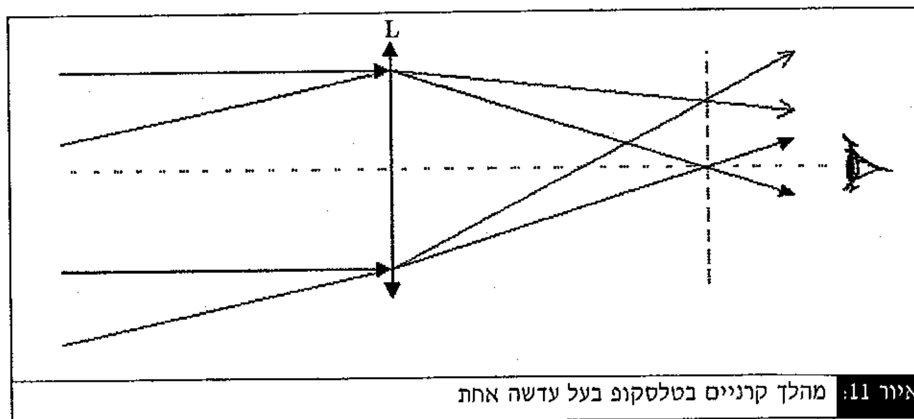
א. מבנה הטלסקופ ועקרונות פעולתו

מבוא

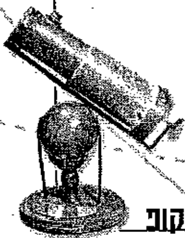
כולנו יודעים שהטלסקופ הוא הכלי החשוב ביותר באסטרונומיה. עם זאת בדרך-כלל מי שמסתכל בטלסקופ בפעם ראשונה, מתאכזב. אנשים מצפים לראות דמויות מוגדלות של כוכבים, אך רואים נקודות אור זעירות כמעט כמו שראו ללא טלסקופ. כמובן, מדובר בתצפית של כוכבים ולא כוכבי-לכת (פלנטות) במערכת השמש. בניגוד לפלנטות, כוכבים (שמשות) נמצאים במרחקים כל-כך גדולים מכדה"א, כך שלכל צורך מעשי ניתן להתייחס אליהם כאילו הם נמצאים באין-סוף. לכן כוכבים אלה הם למעשה מקורות אור נקודתיים הנמצא באין-סוף, וקרני האור המגיעות מהם הן קרניים מקבילות. מכאן שבטלסקופ אידיאלי, ללא עיוותים והפרעות אטמוספריות, מתקבלות דמויות נקודתיות של הכוכב. אך אם אי-אפשר לקבל בטלסקופ הגדלה משמעותית של דמות הכוכב (לפחות, בדרך ישרה), מהו אם כך תפקיד הטלסקופ וכיצד ניתן להשתמש בו?

טלסקופ בעל עדשה אחת

נתחיל את ההיכרות עם הטלסקופ בדגם הפשוט ביותר שניתן להעלות על הדעת - טלסקופ המכיל רק מראה או עדשה אחת (איור 11). נניח שבשדה הראייה של הטלסקופ כעת נמצאים שני כוכבים: כוכב "כחול" - במרכז של שדה הראייה וכוכב "אדום" בצד. כיוון שקרניים באלומות האור המגיעות משני הכוכבים מקבילות, הן ייפגשו במישור המוקד של העדשה (מראה) הראשית. עבור כל כוכב תתקבל דמות נקודתית. כאשר מנצלים טלסקופ לצורך מדידות, מציבים במישור המוקד את סרט הצילום או את המטריצה של מצלמת CCD. אמנם הדמויות של הכוכבים עדיין נקודתיות, אך בהירותן של נקודות אלה הרבה יותר גדולה מאשר הן נראות לעין, כי הטלסקופ "אוסף" אור משטח גדול הרבה יותר משטח אישון-עין.



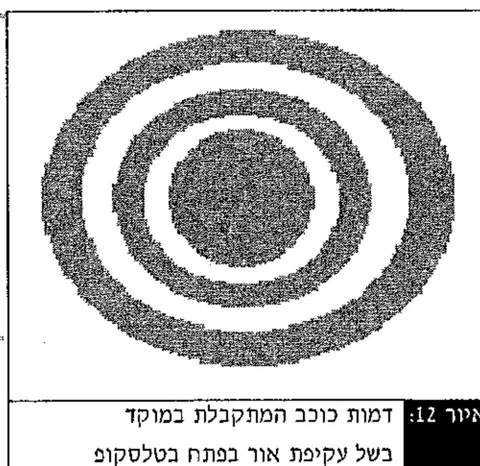
איור 11: מהלך קרניים בטלסקופ בעל עדשה אחת



האומנם דמות נקודתית?

על מנת לחשב השפעת דמות של כוכב על חיישן האור המוצב במישור המוקד, יש לקחת בחשבון שבמציאות לא תתקבל דמות נקודתית. הסיבה לכך היא עקיפת אור בפתח הטלסקופ. כתוצאה מכך במקום הנקודה מתקבלת תבנית עקיפה של אור בפתח עגול (איור 12). הרדיוס הזוויתי של הכתם המרכזי (שמכיל כ- 95% מאור הכוכב) שווה ל-

$$\alpha\,(\text{rad}) = 1.22\,\frac{\lambda}{D}$$



איור 12: דמות כוכב המתקבלת במוקד בשל עקיפת אור בפתח בטלסקופ

כאשר α - הגודל הזוויתי של רדיוס הכתם
D - קוטר של עדשה (מראה) ראשית
λ - אורך הגל שבו מתבצעת תצפית

זווית הרדיוס מוגדרת

$$\alpha = r / F$$

כאשר F - רוחק המוקד של הטלסקופ,

הרדיוס של הכתם במישור המוקד של הטלסקופ שווה ל-

$$r = F\,\alpha = 1.22\,\frac{F}{D}\,\lambda$$

חיישני אור, כגון סרט צילום או מטריצת CCD, מגיבים ביחס לכמות האור המגיעה ליחידת שטח של חיישן-הארה. עוצמת ההארה תגדל ככל שפתח הטלסקופ יהיה גדול יותר, ותקטן ככל ששטח הכתם יהיה גדול יותר (כלומר, האור יתפזר בשטח גדול יותר).

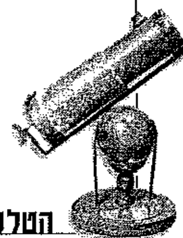
השימוש בטלסקופ בתצפית אסטרונומית מאפשר לצופה לראות כוכבים חיוורים יותר. ההבדל נובע מייחס בין כמות האור הנאספת על-ידי הטלסקופ לבין כמות האור הנקלטת על-ידי העין, היחס הוא: D^2 / δ^2, כאשר δ הוא קוטר האישון. מכאן, שאדם הרואה כוכב שהגודל הנראה שלו ישווה ל-$6m$[2], באמצעות הטלסקופ יוכל לראות כוכב שהגודל הנראה שלו שווה ל-

$$m = 6^m + 5\log\frac{D}{\delta}$$

בהנחה שקוטר אישון העין הוא 0.5 ס"מ, והתצפית מתבצעת בטלסקופ שקוטרו 60 ס"מ, יצלית הצופה לראות כוכבים עד גודל נראה 16^m, וטלסקופ שקוטרו 6^m מאפשר לראות כוכבים עד 21^m.

---

[2] הגודל הנראה של הכוכבים מציין את מידת הבהירות שלהם בשמים. לפי הסימון שהונהג בימי היוונים הגודל הנראה של כוכבים בהירים ביותר בשמים הוא 1. הגודל הנראה של הכוכבים החיוורים ביותר שעין אנוש מסוגלת להבחין בהם, הוא 6. בעזרת הטלסקופ ניתן להבחין בכוכבים חיוורים הרבה יותר, ולכן בעלי גודל נראה גדול יותר.



בעיותיו של טלסקופ בעל עדשה אחת

נחזור עתה לטלסקופ פשוט שלנו בעל עדשה (מראה) אחת. השימוש בו לתצפית ויזואלית אינו נוח מכמה סיבות: ראשית, אלומת האור היוצאת מדמות הכוכב שמתקבלת במישור המוקד, היא אלומה מתפזרת (ראה איור 13). כמו שניתן לראות במצב כזה, חלק מן האור לא נכנס לעין ועובר בצד. כלומר, התכונה העיקרית של הטלסקופ - יכולת **איסוף אור** משטח גדול ומיקודו לשטח קטן וכך ליצור דמויות בהירות יותר התכונה הזאת אינה מנוצלת.

שנית, העין שנמצאת במרחק של הראייה הטובה ביותר (כ-25cm) מדמות של כוכב מסוים, קולטת אור שבא רק מהדמות הזאת. קרני אור היוצאות מדמויות אחרות עוברות בצד (ראה איור 13). זה אומר **ששדה הראייה** של הטלסקופ הוא מצומצם מאוד ומאפשר כל פעם לראות רק כוכב אחד. לשדה הראייה המצומצם מעורר בין היתר בעיית זיהוי של כוכב מסוים בשמים, כיוון שכדי לזהות את הכוכב הצופה צריך לראות גם את סביבתו של הכוכב.

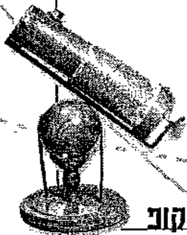
שלישית, יחס **ההגדלה הזוויתית** הנו קטן בטלסקופ בעל עדשה יחידה. כידוע, טלסקופ אינו מגדיל את דמות הכוכב, אך קל לראות שזווית בין שני כוכבים (בין כיוונים אל הכוכבים) משתנה בעת תצפית דרך טלסקופ. אם נסמן זווית בין שני הכוכבים כמו שהם נראים לעין ב-α, וזווית בין שתי דמויות הכוכבים כמו שהן נראות לעין בטלסקופ ב-β, אזי ההגדלה הזוויתית של הטלסקופ היא β/α. כיוון ששתי הזוויות הן קטנות, נוכל לכתוב:

$$k = \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{\tan\beta}{\tan\alpha} = \frac{F}{d}$$

כאשר F - רוחק המוקד של עדשה (מראה) ראשית של הטלסקופ,
d - מרחק של הראייה הטובה ביותר של העין.

כיוון ש- $d \approx 25$ cm, הדרך היחידה שבה ניתן להגדיל את k (ואז להפריד בתצפית בין כוכבים קרובים) היא להגדיל את F. כאשר רוצים לקבל k=100 (ערך די צנוע), צריכים להשתמש בטלסקופ שאורכו לפחות 25m! זה בלתי אפשרי, כמובן.

פתרון הבעיות הללו נעשה על-ידי הנספת עדשה שנייה - עינית (ראה איור 3). תפקיד העינית - להפוך את האלומות המתפזרות היוצאות מדמויות הכוכבים לאלומות של קרניים מקבילות. מעניין שאז מבחינת העין דמות הכוכב שוב נמצאת באין-סוף - כמו שזה היה בתצפית ללא טלסקופ. במצב כזה האלומות של כל הכוכבים הנמצאים בשדה הראייה של הטלסקופ נפגשות במישור $0_3\,0_4$, המכונה "מישור האישון". כאשר עין נמצאת במישור האישון, היא קולטת אור באותו זמן לא רק מכוכב אחד אלא כמה כוכבים. כלומר שדה הראייה של טלסקופ כזה רחב יותר. מכאן שבזמן תצפית עין לא צריכה להיות צמודה ממש לעינית, טעות נפוצה של מתחילים. יש להזיז את העין עד שנמצא מקום, שבו שדה הראייה הוא הרחב ביותר. זהו מישור האישון.



היכן יש להציב את העין בזמן צפייה בטלסקופ?

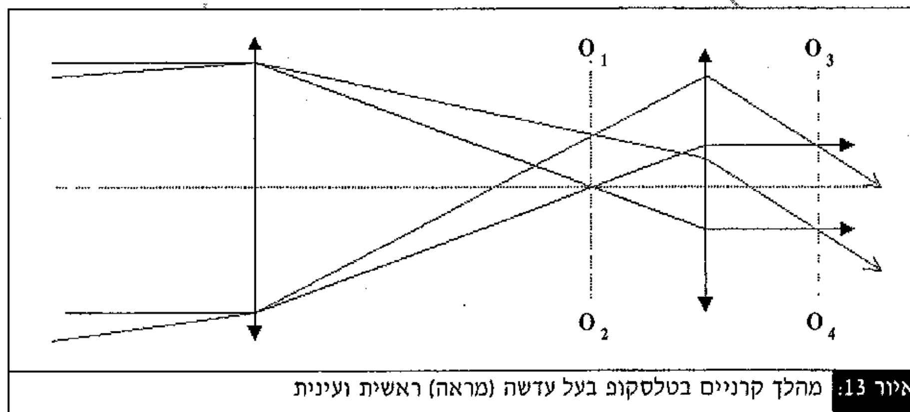
מיקום העין נקבע על-ידי מישור המוקד. כיצד קובעים את מיקום העינית? בהתאם לתפקידה של העינית, מישור המוקד שלה מתלכד עם מישור המוקד של עדשה (מראה) ראשית $0_1 0_2$. במילים אחרות, מרחק בין העינית לבין מישור $0_1 0_2$ שווה ל-**f** רוחק המוקד של העינית. ככל שמרחק **f** יהיה קטן יותר, רוחב האלומות היוצאות מן העינית גם כן יהיה קטן יותר. על מנת לא לבזבז אור הנאסף על-ידי הטלסקופ רצוי מאוד שרוחב האלומות לא יעלה על קוטר אישון העין (כ-6 mm). זה התנאי שקובע את מיקום העינית.

נחשב עתה את **ההגדלה הזוויתית k** של הטלסקופ

$$k = \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{\tan\beta}{\tan\alpha} = \frac{F}{f} = \frac{D}{\delta}$$

כאשר **D** - קוטר של עדשה (מראה) ראשית של טלסקופ

δ - קוטר אלומה ביציאה מן העינית



איור 13: מהלך קרניים בטלסקופ בעל עדשה (מראה) ראשית ועינית

כיוון ש- $\delta < \delta eye$, אז $k > D / \delta eye$. הביטוי האחרון מביא אותנו למושג של "הגדלה מינימלית" של טלסקופ:

$$k_{min} = D / \delta eye$$

למשל, אם קוטר של טלסקופ 30 cm (300 mm), אז ההגדלה המינימלית שלו שווה ל-50. הגדלה נמוכה מזאת יוצרת מצב, שאור של כוכב לא נכנס כולו לעין, אלא עובר בצד (מתבזבז).



כושר ההפרדה של הטלסקופ

הכרנו את המושג "הגדלה מינימלית", האם קיים מושג "הגדלה מקסימלית"? התשובה היא כן. מושג זה קשור למושג של **כושר הפרדה** של טלסקופ. הזווית הקטנה ביותר שעין אנוש מבחינה בה היא כ-1' (דקת קשת אחת). כאשר שני כוכבים נמצאים סמוך זה לזה, אפשר תיאורטית להגדיל את הזווית ביניהם עד ל-1', וכך לראות אותם ככוכבים נפרדים. אך כאשר לוקחים בחשבון השפעה עקיפה על היווצרות דמות של כוכב, נוצרת בעיה. השיפור בהגדלה מאפשר לראות את תבנית העקיפה ולא דמות נקודתית של כוכב. נתבונן באיור 14. תבנית העקיפה של שני כוכבים קרובים נראית מסובכת, וניתן להבין שהחל ממרחק מסוים לא נוכל להבחין אם אנו רואים כוכב אחד או שניים. על-פי קריטריון של **Rayleigh**, שני כוכבים בעלי בהירות זהה נראים נפרדים, כל עוד הזווית ביניהם גדולה מ- 0.85 α, כאשר α היא הקוטר הזוויתי של הכתם המרכזי בתבנית העקיפה של כל אחד מהכוכבים. ניקח ביטוי מתמטי של α



איור 14: תבניות עקיפה של שני כוכבים קרובים

$$r\,(rad) = 1.22\ \frac{\lambda}{D}$$

ונהפוך אותו לשימושי יותר. כיוון שמדובר בתצפית בעין, אורך הגל המתאים לרגישות מקסימלית של העין הוא = λ = 550 nm. אם במקביל נבטא את ה-α בשניות קשת ו-D בסנטימטרים, נקבל:

$$\alpha'' = \frac{14}{D_{cm}}$$

במצב זה שהזווית המינימלית בין שני הכוכבים שנראים נפרדים היא:

$$\beta'' = 0.85 \times \alpha'' = \frac{12}{D_{cm}}$$

עין אנושית אינה מצליחה לראות זווית קטנה מ-1'. על מנת לנצל את יכולת העין להבחין בפרטים, טלסקופ צריך להגדיל זווית β עד לגודל 60" = 1'. הגדלת הטלסקופ במצב כזה תהיה:

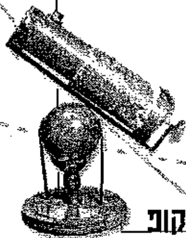
$$k_{max} = \frac{60''}{\beta''} = 5 \times D_{cm}$$

סימנו את ההגדלה הזאת כהגדלה מקסימלית, כיוון שהגדלה גבוהה יותר לא תגלה לצופה יותר פרטים בדמות של גרם השמים (קריטריון **Rayleigh**!). יתר על כן, הגדלה מעבר ל-k_{max} רק מטשטשת את איכות הדמות, כי דמות הכוכב מפסיקה להיות נקודתית, אור של כוכב מתפזר על שטח של תבנית העקיפה והארת הדמות קטנה. נזכיר, עין אנושית, כמו כמעט כל חיישן אור, מגיבה על הארת אור.

נחזור לדוגמה הקודמת עם טלסקופ בעל קוטר 30 cm. עכשיו נוכל להסיק שהגדלת הטלסקופ צריכה להיות:

$$k_{min} = 50 < k < k_{max} = 150.$$

עתה נוכל להשוות בין כושר ההפרדה של עין בלתי מצוידת לבין כושר ההפרדה של עין המסתכלת דרך טלסקופ. על-



פי ההגדרה, כושר ההפרדה הוא גודל הנמצא ביחס הפוך לזווית המינימלית (נמדדת ברדיאנים) הניתנת לראייה. במילים אחרות: כושר ההפרדה של עין בלתי מזוינת שווה ל:

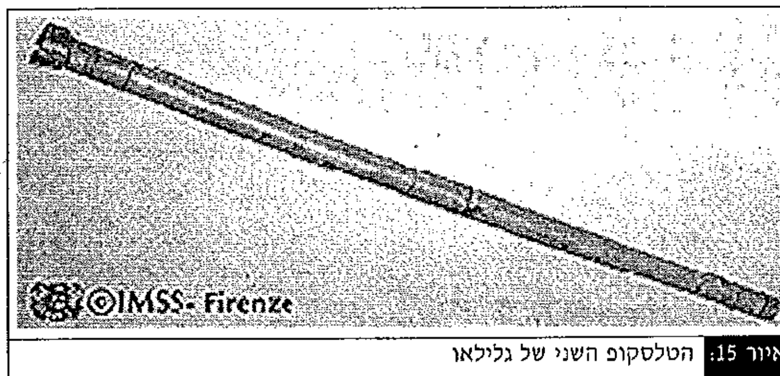
$$R = \frac{1}{0.00029\,rad} = 3448$$

לעומת זאת כושר ההפרדה של עין המצוידת בטלסקופ גדלה פי- k_{max}, ובדוגמה שלנו היא שווה ל: R = 517,200. יש להדגיש שאם ננסה לעבור את ההגדלה המרבית של הטלסקופ, לא ישתפר כושר ההפרדה. במקרה זה יגדל שטח תבנית העקיפה של מקורות האור, ועוצמתם תרד. כך שרגישות העין לא תאפשר לראות פרטים נוספים, להפך הדמות תיטשטש.

ב. התפתחות הטלסקופ

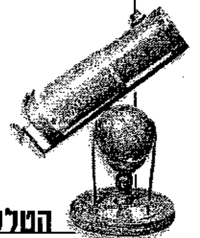
הטלסקופ של גאלילאו

ההיסטוריה של הטלסקופ האסטרונומי התחילה בשנת 1609, כאשר המדען האיטלקי גלילאו (Galileo) שמע לראשונה על תחילת השימוש במשקפיים בהולנד. גלילאו בנה מכשיר דומה בשבעה לינואר 1610 התחיל בתצפיות שיטתיות. הטלסקופ הראשון של גלילאו היה די קטן: קוטר - 4 cm, רוחק המוקד - 50 cm, מקדם הגדלה - 3^x, אך את התגליות המעניינות ביותר עשה גלילאו באמצעות הטלסקופ השני שלו (קוטר - 5.4 cm, רוחק המוקד - 125 cm, מקדם הגדלה - 34^x cm).

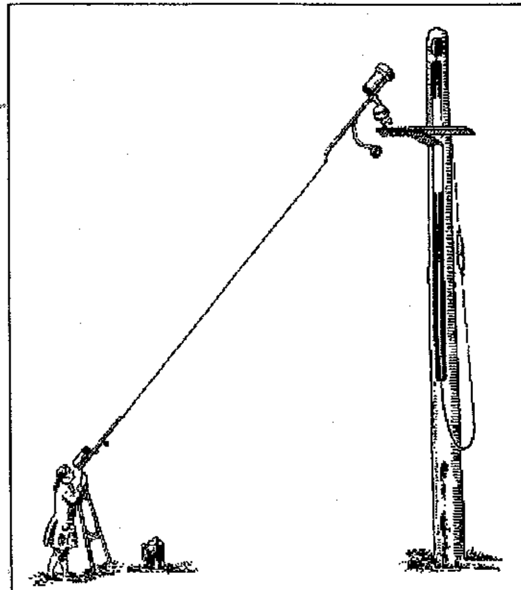


איור 15: הטלסקופ השני של גלילאו

הוא גילה הרים ומכתשים על פני הירח, ארבעה ירחים של צדק, כתמים על פני השמש, מופעי נוגה, צבירי כוכבים בתוך שביל החלב. הוא חקר את תנועתם של הירח וירחי צדק על מנת לנצל אותם כ״שעון שמימי״ למדידת קו אורך של אנייה בלב ים. האסטרונום הדני רומר (O.Romer) המשיך בחקירת תנועתם של ירחי צדק במטרה להגיע לרמת דיוק גבוהה יותר, אך ב-1675 מצא לפתע ששעון ירחי צדק אינו מדויק די הצורך. במדידותיו התגלו סטיות במיקום הירחים, בהתאם לזמן הצפוי. רומר הסביר את הסטיות במהירות סופית של האור ובשינוי המרחק בין הצדק לכדה״א. בכך הצליח רומר להעריך את מהירות האור. על-פי הערכה של רומר, האור עובר את המרחק בין השמש לבין כדה״א במשך 8 עד 11 דקות.



טלסקופים עם עדשות פשוטות



איור 16: טלסקופ אווירי של הויגנס

בעצם, ה"טלסקופ" של גלילאו לא היה עדיין טלסקופ, אלא רק משקיף, כי גלילאו השתמש בעדשה מפוזרת בתור עינית. יוהנס קפלר (Kepler) היה הראשון שבנה טלסקופ ממשי. הוא החליף את העדשה המפוזרת בעינית לעדשה מרכזת. כך התאפשרה התקנת רשת חוטים במישור המוקד של הטלסקופ ושימוש בטלסקופ לא רק לתצפית איכותית, אלא גם לביצוע מדידות ולמדידת זוויות קטנות.

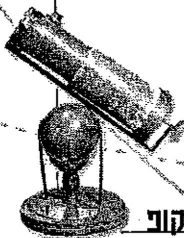
הבעיה המרכזית של טלסקופים במאה ה-17 הייתה אברציה כרומטית. בגלל נפיצת אור במעבר האור דרך עדשה ראשית של טלסקופ התקבלה תמיד דמות צבעונית ומטושטשת (כי רוחק המוקד של העדשה שונה עבור אורכי גל שונים). הפתרון היה להגדיל את רוחק המוקד של העדשה הראשית של הטלסקופ וכך להקטין את השפעת הצבעים על דמויות של גרמי השמים. זאת הייתה ההצעה של כריסטיאן הויגנס (Huygens), שהשקיע מאמצים רבים בפיתוח מכשירים אופטיים, ובין היתר קיבל את הנוסחה המפורסמת של עדשה:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}$$

בהתאם להצעת הויגנס נבנו "טלסקופים אווירים" באורך של **37 m** (על-ידי **Huygens Ch**. ראה איור 16), **45 m** (על-ידי **Hevelius J.**) ו-**65 m** (על-ידי **Bradley J.**). קשה מאוד היה לעבוד בטכניקה כזאת, אך בכל זאת אסטרונומים הצליחו לגלות באמצעותה דברים חשובים. כך גילה הויגנס את טבעות שבתאי ואת ששת ירחיו. קאסיני (**Cassini**) הצליח למדוד זמני סיבוב עצמי של מאדים, נוגה וצדק וגם גילה את כיפות השלג על מאדים. בראדלי (**Bradley**) גילה מתוך ניסיונות למדוד פרלקסות של כוכבים, שכוכבים סוטים ממקומותיהם בשל תנועת כדה"א סביב השמש (אברציית אור).

דור ראשון של רפלקטורים

ניוטון (**Newton**) ניסה לפתור את הבעיות שהתעוררו בטלסקופי עדשות (רפלקטורים) בעזרת שימוש במראות. ניוטון חקר את התופעה של שבירת האור. הוא הניח ששבירת האור ונפיצה הן שתי פנים של אותה התופעה, אך בטעות הסיק ש"מקדם הנפיצה", $dn / d\lambda$, זהה בכל החומרים השקופים, ולא ניתן להתגבר על בעיית הנפיצה ברפלקטורים. לכן ניוטון חיפש רעיונות אחרים ובנה ב-1668 את טלסקופ המראות הראשון. בטלסקופ הזה הייתה המראה מארד בקוטר 2.5 ס"מ ומרחק מוקד 16.5 ס"מ. באמצעות הטלסקופ הגיע ניוטון להגדלה של **41^x**. ניוטון אף מצא הרכב מתאים של הארד (6 חלקים של נחושת, 2 חלקים של בדיל וחלק אחד של ארסן), כדי שהמתכת תהיה יותר מבריקה ונוחה לליטוש.





איור 17: טלסקופ המראות של ניוטון

רעיונותיו של ניוטון פותחו ע"י הרשל (**Hershel**), שבנה סדרת רפלקטורים בעלי קוטר הולך וגדל. הרשל השתמש בהם לחקירה ומיפוי כוכבי השמים. אחד הטלסקופים הטובים ביותר שלו היה הרפלקטור עם קוטר של מראה ראשית **30.5 cm** ורוחק המוקד **6.1 m** (1783). שדה הראייה של הטלסקופ היה גדול יחסי 0.25^0. בטלסקופ זה בוצעה חקירת התפלגות כוכבי השמים. בעקבות החקירה הגיע הרשל למסקנה, שכוכבים שנצפו בתקופתו שייכים למערכת אחת גדולה - גלקסיית שביל החלב.

הצעד הבא נעשה על-ידי לורד רוס (**W.Parsons**), אשר ב-1845 בנה רפלקטור בקוטר **1.83 m**, עם רוחק המוקד **15.8 m** והגדלה **6,000** ^{x}. זה היה הטלסקופ הגדול ביותר עם מראה מתכתית. בפעם הראשונה ראו אסטרונומים את המבנה הספירלי של "ערפיליות", חקרו ערפיליות פלנטריות וצבירי כוכבים. בעצם, כמו שאנו יודעים היום, הטלסקופ של לורד רוס פתח למדענים חלון לעולם שמחוץ לגלקסיה שלנו.



תקופת הרפלקטורים

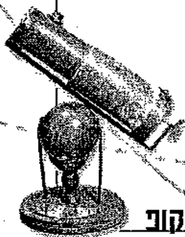
הבעיה המרכזית של הדור הראשון של הרפלקטורים הייתה - אורך החיים הקצר שלהם. מראה מתכתית נשארת מבריקה במשך חודשים ספורים, ולאחר מכן היא מתעמעמת. לכן מדענים תמיד חיפשו שיטות חדשות. ב-1733 בנה מדען אנגלי צ'ארלס הול (Ch. Holl) עדשה, שהייתה מורכבת משילוב של שתי עדשות: הראשונה - הייתה מזכוכית רגילה, השנייה - מזכוכית העשירה בעופרת. הול מצא שדמות המתקבלת בעדשה מורכבת אינה סובלת מבעיות של נפיצת האור. הרעיון היה מוצלח מאוד, ורפלקטורים עם עדשות מורכבות התחילו לשמש בכל מצפי הכוכבים. איכות הטלסקופים הללו הייתה גבוהה מאוד ולא שונה מאיכות הטלסקופים של ימינו. באמצעות טלסקופים כאלה מדדו סטרוב (Struve 1837), בסל (Bessel 1838) והנדרסון (Henderson 1839) בפעם ראשונה פרלקסות של שלושה כוכבים: וגה (ϕ = 0."125±0."055 α Lyr), ברבור 61 (ϕ = 0."314±0."014 61 Cyg), ואלפא סנטאורי (ϕ = 0."756±0."11 α Cen) בהתאמה.

בשנת 1862 גילה אלווין קלארק (Alvan Clark) באמצעות טלסקופ עדשות בקוטר 47 ס"מ, ש-סריוס (α CMa) הוא כוכב כפול ושבן-זוגו - כוכב מסוג חדש - ננס לבן. מניתוח נתוני התצפיות בננסים לבנים התברר שהחומר שממנו מורכב הננס לבן דחוס מאוד ונמצא במצב שעוד לא היה ידוע לפיזיקאים באותה תקופה, מצב של חומר מנוון. רק במאה ה-20, בעקבות התפתחות הפיזיקה הקוונטית, הצליחו מדענים לבנות תאוריה של חומר מנוון ולמצוא דוגמאות נוספות על פני כדה"א (למשל, גז מנוון של אלקטרונים בתוך מתכת).

דור שני של רפלקטורים:

טלסקופ-עדשות הוא טלסקופ מצוין ומאפשר ביצוע מדידות ברמת דיוק גבוהה ביותר. הבעיה היחידה שלו - הקוטר המוגבל של העדשה הראשית. מעולם לא יוצרו רפרקטורים בעלי עדשה ראשית הגדולה מ-1.5 מטרים. לעדשות גדלות יותר קשה להבטיח שקיפות די גבוהה ואחידה, ועלותה הייתה גבוהה ביותר.

ב-1856 פיתח הפיזיקאי הגרמני קארל סטינהיל (Carl Steinheil) שיטה לציפוי מראות זכוכית בשכבה דקה של כסף. באותה שנה בנה סטינהיל רפלקטור פרבולי בקוטר 10 ס"מ בעל מרחק מוקד 2.44 מטר. בו-זמנית השתמש אסטרונום צרפתי פוקו (J. Foucault) באותה טכנולוגיה ובנה רפלקטור משוכלל הרבה יותר, בקוטר 15 ס"מ ומרחק מוקד 80 ס"מ. שני הטלסקופים הללו התחילו תקופה של טלסקופים-רפלקטורים שנמשכת עד היום. בהשוואה עם רפרקטורים לרפלקטורים יש יתרונות וחסרונות.



יתרונות:

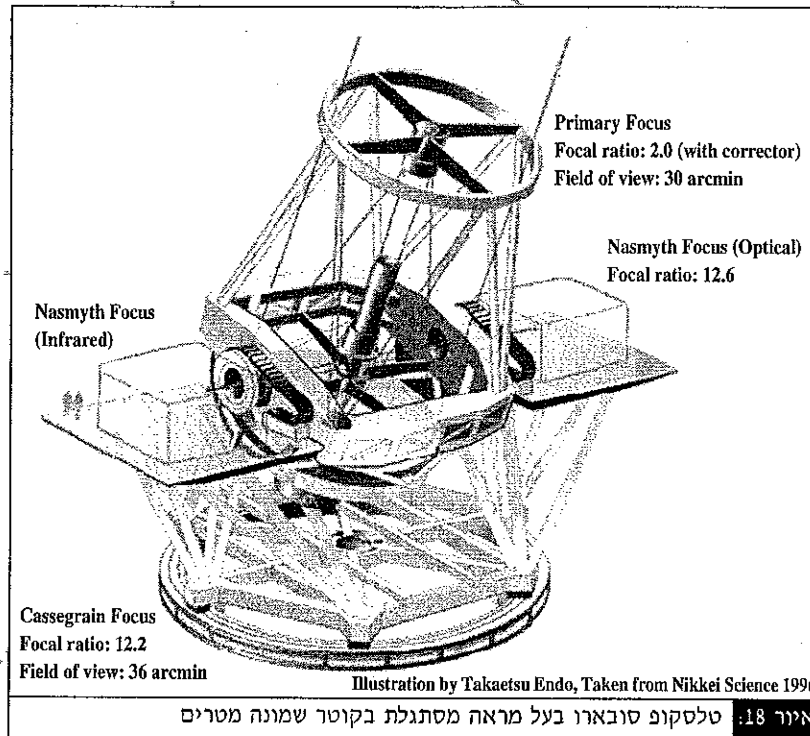
א. קוטר המראה כמעט בלתי מוגבל. היום קוטר של טלסקופ-המראות הגדול ביותר בעל מראה אחת שווה ל-**8 m** (**project Subaru Japan**).

ב. יכולת חקירה של קרינה אולטרה-סגולה (שנבלעת על-ידי עדשה של טלסקופ-רפרקטור).

ג. מקדם של החזרת האור גבוה: כ-90% לעומת 60% של מראה מתכתית עשויה ארד.

ד. דמות של גרם השמים אינה מושפעת מאברציה כרומטית.

ה. יכולת קיצור אורך של טלסקופ על-ידי שימוש במערכת אופטית מתאימה, כגון מערכת **Cassegrain** או **Ritchey-Chretien**.



איור 18: טלסקופ סובארו בעל מראה מסתגלת בקוטר שמונה מטרים

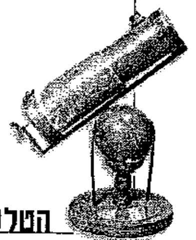
חסרונות:

א. שדה ראייה קטן יחסית שלא מושפע מעיוותים כדוריים ועיוות פסיק.

ב. רגישות גבוהה של דמויות הכוכבים לסטיות קטנות של מראה ראשית. לכן עד הזמן האחרון לצורך מדידות אסטרומטריות השתמשו דווקא בטלסקופי עדשות.

ג. רעש רקע משמעותי של אור מפוזר. שכבת כסף או אלומיניום מורכבת מגרגרים קטנים, ולכן יחד עם החזרה מסודרת של אור קיימת גם החזרה מפוזרת.

ד. תלות חזקה של מרחק המוקד של המראה הראשית בטמפרטורה. בנוסף, אם טמפרטורת המראה אינה אחידה, צורת המראה מתעוותת.



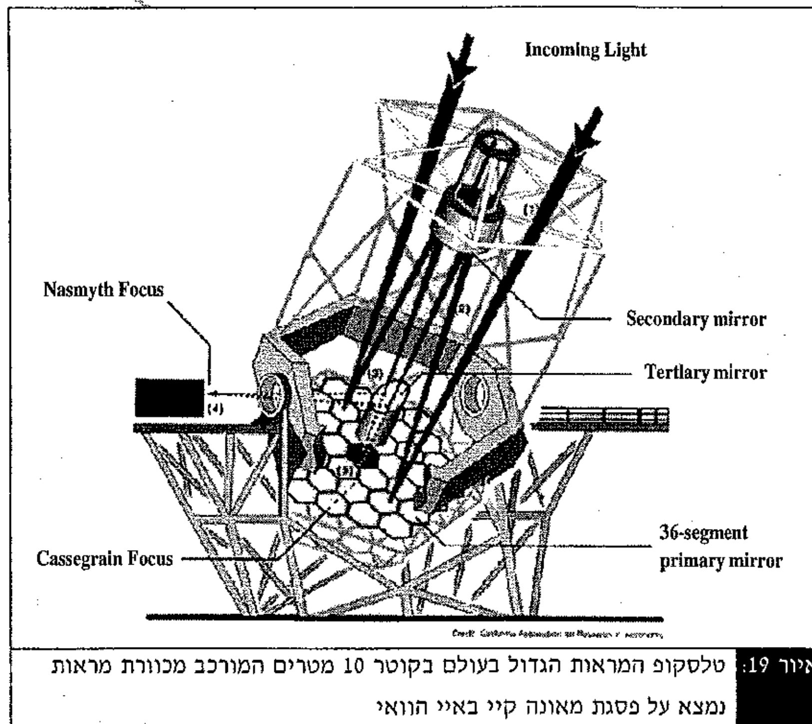
כיוון שהתפקיד הראשי של טלסקופ הוא איסוף אור של כוכבים, קוטר הפתח של טלסקופ הוא המאפיין העיקרי. לכן התפתחות טלסקופים של היום היא התפתחות של רפלקטורים. היום בבניית מראות של טלסקופים כבר אין משתמשים בזכוכית: בוחרים חומרים פחות רגישים לטמפרטורה וחזקים יותר: פיירקס, סיטל, קוורץ. במקום שכבה אחת של כסף מצפים מראות בכמה שכבות שונות, כך שמקדם החזרת האור מגיע ל-95-98% בלא תלות באורך הגל של הקרינה. הטלסקופ המודרני בעל מראה ראשית בקוטר 50 ס"מ בלבד, המצויד בחיישן אור רגיש (מצלמת **CCD**), מאפשר לחקור כוכבים עד לגודל נראה $24\text{-}25^{m}$, שמתאים לבהירות של נר הנמצא במרחק 38,000 ק"מ מהצופה!

מראות מורכבות ואופטיקה מסתגלת

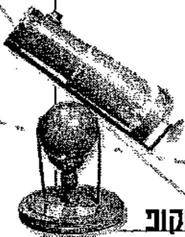
בתצפית מעל פני כדה"א אחת הבעיות הקשות ביותר היא השפעת האטמוספרה על דמות של גרם שמימי. צפיפות האוויר משתנה באופן אקראי כתוצאה מתנועת האוויר עם שינויי מזג-האוויר. קרני האור המגיעות מכוכב מתפזרות וסוטות מכיוונן המקורי במעבר דרך האטמוספירה. חזית הגל שהייתה שטוחה מתעוותת. כתוצאה מכך אנו נראה בטלסקופ במקום דמות נקודתית כתם אור זז ומשתנה.

כדי להבין את הרעיון של אופטיקה המסתגלת (אדפטיבית) נדמיין אגם ומראה אנכית מישורית מוצבת על חוף האגם. כאשר המים באגם רגועים, עצים משתקפים במים ושוב משתקפים במראה. עתה נזרוק אבן אל תוך המים. גל שנוצר סביב נקודת הפגיעה ישבש את הדמות המשתקפת במים, וגם ישבש את הדמות המתקבלת במראה. אך אם המראה די גמישה ואנו נשנה את צורתה בזריזות ובדרך נכונה, נוכל לנטרל את השפעת הגל על הדמות ולראות את הדמות הרגועה במראה.

כיום קיימות שלוש שיטות עיקריות למימוש הרעיון:



איור 19: טלסקופ המראות הגדול בעולם בקוטר 10 מטרים המורכב מכוורת מראות נמצא על פסגת מאונה קיי באיי הוואי

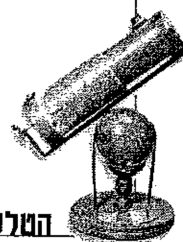


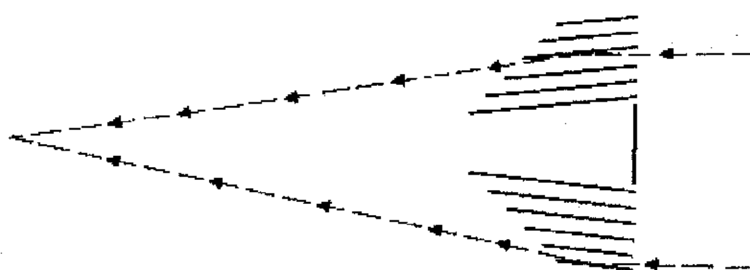
השיטה הראשונה לתיקון עיוותים אטמוספריים מבוצעת בעזרת המראה הראשית של טלסקופ המורכבת ממספר מראות בלתי תלויות. משפרים את דמות הכוכב על-ידי הזזת כל מראה לחוד (לדוגמה: טלסקופ רב-מראות (MultyMirror Telescope MMT) והטלסקופ הגדול ביותר בעולם Keck telescope הנמצא באי הוואי, שקוטר המראה המורכבת שלו הוא 10 מטרים). בשיטה השנייה יוצרים את המראה הראשית דקה ודי גמישה, כדי שבאמצעות מחשב וכמות גדולה של מוטות יתאפשר לשלוט בצורת המראה (דוגמה: טלסקופ סובארו (project Subaru Japan) טלסקופ שקוטרו 8 m). השיטה השלישית היא הזולה ביותר ובעצם לא קשורה למבנה הטלסקופ. בשיטה זו משתמשים במתקן דמות (image corrector), שהוא התקן הבנוי ממטריצה של מראות שטוחות קטנות, רבות ביותר, שניתן לכוונן באופן בלתי תלוי. משגרים אלומת אור צרה מהטלסקופ הפוגעת באטמוספרה ויוצרת דמות כוכב מלאכותי. אור המוחזר מדמות הכוכב המלאכותי מגיע לחיישן האור המותקן בטלסקופ.

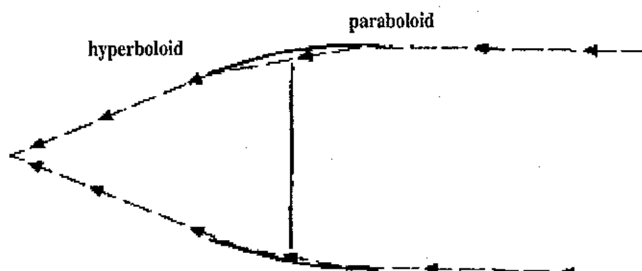
על-ידי הזזות עדינות של המראות ניתן לשפר את הדמות המתקבלת בחיישן האור, ולאחר קבלת דמות חדה ניתן להתחיל לצפות בכוכבים. קיימת גם שיטה רביעית, העוקפת את בעיית העיוותים שיוצרת האטמוספרה. די לשגר חללית עם טלסקופ מחוץ לאטמוספרה הארצית, ובכך להתגבר על הבעיה (טלסקופ האבל, לדוגמה).

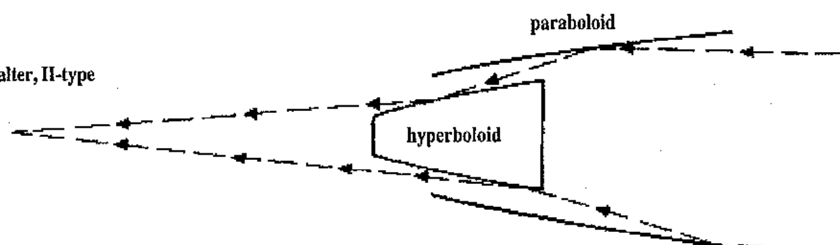
טלסקופים לקרינת רנטגן

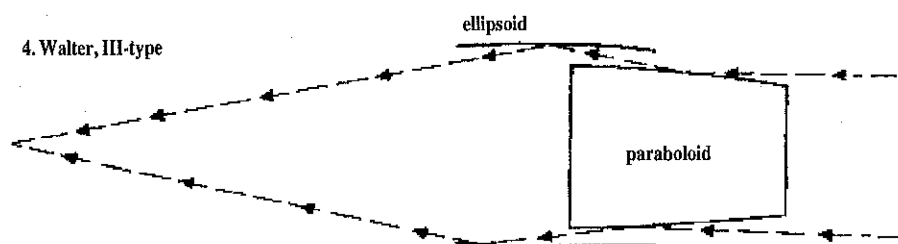
בתחום קרינת הרנטגן לאף חומר אין מקדם החזרה העולה על 8%. לכן מכשירים אופטיים קונבנציונליים אינם מתאימים לתחום הזה. למזלנו קרני רנטגן נשברות במשטחים מוצקים, שמקדם השבירה n שווה: $n = 1 - \Delta$, ו-$\Delta \approx 10^{-3} - 10^{-6}$. כתוצאה מכך קרני רנטגן הפוגעות בשטח מלוטש ובזווית פגיעה הקטנה מהזווית הקריטית ($\cos\theta = n$), יוצרות החזרה פנימית גמורה. קרוב ל-50% מהקרינה מוחזרת, ושאר הקרינה ב- 50 % נבלעת. היום קיימות סכמות אופטיות שונות המקיימות את התנאי, שזווית הפגיעה צריכה להיות קטנה מאוד (ראה איור 2). כמו שניתן לראות, מהלך קרניים בטלסקופ רנטגן בסופו של דבר דומה למהלך קרניים בטלסקופ אופטי בעל עדשה (מראה) אחת. גם כן קרניים מקבילות נפגשות בנקודה אחת, שהיא הדמות של גרם השמים.



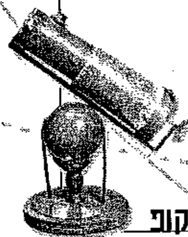


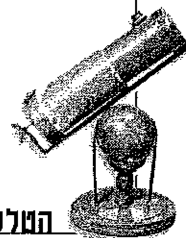






איור 20: סכמות של טלסקופים לקרינת רנטגן





הטלסקופ

פרק ו': האטמוספרה



פעילות 13: השמש השוקעת

מה דעתך?

בחלק זה ישחזר התלמיד את מראה השמש השוקעת. בקרב בני-אדם יש נטייה לא לשים לב לפרטים, אם אין בהם צורך ממשי. הם אינם נוטים לשים לב לפרטי הצבעים ולצורות של השמש בעת השקיעה, בחלק זה מתבקש התלמיד לפרט את ידיעותיו ואת אמונותיו לגבי שקיעת השמש. בסוף התהליך נוכל לבחון את השינויים שעבר.

בסעיף "מה דעתך?" בפרק זה כללנו שבע שאלות העוסקות בנקודות רבות. במקרה של אילוצי זמן ניתן לצמצם את שלב "מה דעתך?" ולהסתפק בשלוש השאלות הראשונות. התשובות לשאלות אלה נועדו לסייע למורה, אך אין להציגן בשלב "מה דעתך?" כדרכנו, נשמור על שלושה שלבים בחלק זה של השיעור: מענה אישי, דיון בקבוצות קטנות, דיון כיתתי שמטרתו איסוף עמדות התלמידים לפני ביצוע הפעילות.

1. הצבע האופייני של השמש בשעת השקיעה אינו קבוע. פעמים רבות צבע השמש אינו משתנה כמעט בזמן השקיעה, אך יש ימים שבהם צבע השמש כתום בדרגות בהירות משתנות. לעתים תיראה השמש בשעת השקיעה אף בצבע אדום. הדבר תלוי במצב האטמוספרה, כמות אדי המים או כמות האבק וגורמי פיזור נוספים שהיא מכילה. גם לטמפרטורה יש השפעה על מידת הפיזור.

2. בתנאים שבהם רמת הפיזור באטמוספרה גבוהה, עיגול השמש בסמוך לאופק אינו נראה בצבע אחיד, נוצרת התפלגות צבעים. צבע כתום בהיר מצוי בחלק העליון של דמות השמש, לקראת החלק התחתון צבעה נוטה לאדום.

3. שאלה זו מאפשרת לתלמיד להציג את עמדת הפתיחה שלו לפני תחילת הפעילות. תלמידים רבים אינם ערים לכך שלמעשה אנו רואים את דמות השמש, ולא את השמש עצמה. בזמן השקיעה השמש נמצאת מתחת לקו האופק. נבחן באיזו מידה מודעים התלמידים לסטיית קרני השמש במעבר מהריק לאטמוספרה.

4. לאחר שקיעת השמש, בשעה שגלגל השמש נעלם מתחת לקו האופק, העולם סביבנו ממשיך להיות מואר באור די בהיר, והחשכה יורדת באופן מאוד מתון. מה גורם לתופעה זו? הלא אם נכבה אור בחדר, מיד ישתרר חושך. בשונה מהנורה השמש אינה כבה בשעת השקיעה, אלא רק מוסתרת מעיני הצופה על-ידי כדה"א. אורה ממשיך לפגוע באטמוספרה, הוא נשבר ומשנה את מהלכו, וחלקו מגיע בפרק-זמן לאחר השקיעה לעיני הצופה. במהלך הזמן שלאחר השקיעה כדה"א מוסיף לסוב על צירו, פחות ופחות אור מגיע לעיני הצופה, והחשכה הולכת וגוברת.



5. שאלה זו נועדה לבדוק את פרק-הזמן בין השקיעה לחשכה מוחלטת. פרק-זמן זה אינו קבוע. ביום מעונן או אביך, שבו פחות אור מגיע אל הצופה, תשתלט החשכה מהר יותר. בימים עם לחץ ברומטרי גבוה יותר קיים פיזור רב באטמוספרה, ואז יגיע יותר אור לאחר השקיעה, וזמן הדמדומים יתארך. כדאי להיזכר בתמונה שצולמה על הירח, המובאת בהמשך בפרק זה (בהרחבה הפיזיקלית), ולראות את צבע השמים השחור. בהעדר מפזרים באטמוספרת הירח (הלא קיימת למעשה) ישרור חושך מיד עם השקיעה. על פני כדה"א עוברת כחצי שעה עד שעה עד חשכה מוחלטת.

6. תלמידים רבים נוטים לציין את צבעי השקיעה במרחב שבין אדום לצהוב. כפי שנלמד בפרק זה, יש מקרים בהם מופיע צבע ירוק בשוליים העליונים של השמש השוקעת, ובמקרים נדירים ביותר אף כחול. אלו מראות נדירים ביותר. שנים סברו שמדובר רק בתעתוע אופטי של העין. בהמשך הפרק נדון באפקט ההבזק הירוק.

7. שאלה זו נותנת ללומד הזדמנות לחוות את השקיעה בצורה מודעת ולרשום את מהלכה.

חלק א: השפעת תווך שקוף על כיוון תנועת האור

במהלך פעילות זו יראה התלמיד את תופעת שבירת האור על-ידי תיווך שקוף.

לפעילות דרושה כחצי שעה.

הציוד הדרוש:

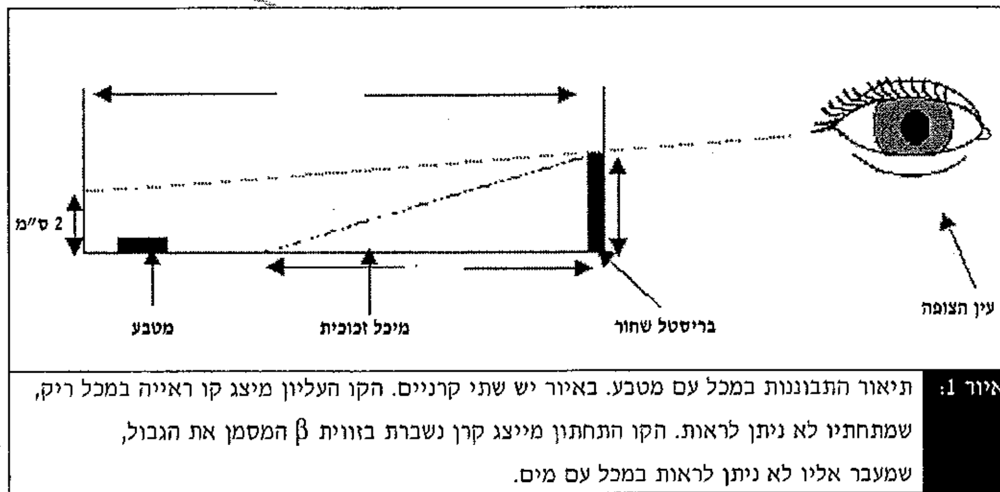
- כלי קיבול שקוף מזכוכית
- פיסת בריסטול להסתרת חלק מדופן הכלי
- מטבע שיהיה האובייקט שאותו ינסה התלמיד לראות.

בזמן שהכלי ריק ממים, המטבע בתחתיתו יהיה מוסתר על-ידי הבריסטול השחור. לאחר שנמלא את הכלי מים, יישברו קרני האור המגיעות מהמטבע בצאתן מהמים אל עיני הצופה. הן ישנו את מסלולן. כך נוכל לראות את המטבע שקודם היה מוסתר על-ידי הבריסטול השחור. זוהי התנסות המעוררת התפעלות אצל תלמידים שלא התנסו בה.



דיון בתוצאות

1. לצורך הדיון נניח שממדי הכלי שבידנו הם לפי הנראה באיור 1.



איור 1: תיאור התבוננות במכל עם מטבע. באיור יש שתי קרניים. הקו העליון מיצג קו ראייה במכל ריק, שמתחתיו לא ניתן לראות. הקו התחתון מייצג קרן נשברת בזווית β המסמן את הגבול, שמעבר אליו לא ניתן לראות במכל עם מים.

זווית הפגיעה של קו הראייה היא α, מתחת לקו זה לא ניתן לראות לכן המטבע נמצא באזור שלא ניתן לראותו. עם הוספת המים נוצרת שבירה בזווית β, שינוי מהלך הקרניים גורם לכך שהמטבע ייכנס לשדה הראייה של הצופה. בדרך זו נוצר "הפלא" של המטבע המופיע עם מילוי המכל במים.

בדוגמה המוצגת באיור 1 הערכים של הזוויות הם:

α = 16.7 מעלות β = 39.7, מעלות, המרחק בין הבריסטול לגבול הראייה הוא 6.0 ס"מ. כלומר, אם במכל המתואר באיור יונח המטבע במרחק X העולה על 6 ס"מ, ניתן יהיה לראותו.

2. מטרתה של שאלה זו לערוך אנלוגיה בין שבירת קרני האור במכל לבין שבירתן בזמן השקיעה. פעילות זו מבהירה מדוע ניתן לראות את השמש גם כאשר היא נמצאת מעבר לאופק. אנלוגיה זו מובהרת באיור 5 בחוברת לתלמיד בעמוד 98.

בדיון שתקיים בכיתה בעקבות תשובות התלמידים, ניתן להעריך כמה זמן לאחר השקיעה עדיין ניתן לראות את השמש. שני גורמים משפיעים על מיקומה של השמש בזמן השקיעה:

א. שבירת האור באטמוספרה - זהו מהלך מורכב, שבו לכל צבע יש מקדם שבירה שונה. אך בקירוב ניתן להעריך שמקדם השבירה באטמוספרה גורם לסטייה של כחצי מעלה. מאחר שהגודל הזוויתי של השמש הוא חצי מעלה, הרי שהשבירה באטמוספרה גורמת לכך שכאשר השמש נראית לנו נוגעת בקו האופק, היא למעשה נמצאת מתחתיו.



ב. מהירות האור - כשמונה דקות חולפות מזמן שהאור יצא את השמש עד שהוא מגיע אל עינינו. קצב סיבוב כדה"א הוא 15 מעלות בשעה או רבע מעלה בדקה. כלומר במשך שמונה דקות של מסע קרני האור בחלל כדה"א נע כשתי מעלות.

לכן בזמן השקיעה, כאשר השמש נראית לנו על קו האופק, היא נמצאת למעשה כ-2.5 מעלות מתחתיות.

חלק ב: ההבזק הירוק

ההבזק הירוק הוא תופעה מיוחדת ונדירה ביותר. במשך מאות שקיעות שמש שבהן צפינו כדי לזכות לראות את ההבזק הירוק, הצלחנו לראות מראות נפלאים, אך לא את ההבזק הירוק. עם זאת יש תיעוד מסודר באתרים רבים ובכתבי-עת המתארים ומסבירים את התופעה. בשל ייחודה של התופעה והקשר שלה אל האטמוספרה כתווך המשפיע על האור המגיע אלינו, ראינו לנכון לשלב פעילות זו. תלמידים רבים שתופעה זו הוצגה לפניהם, הופתעו לשמוע שאכן תופעה כזו קיימת.

מטרת הפעילות להבהיר את תופעת ההבזק הירוק. במרכזה עומד איור 5 המתאר את השמש ושתי דמויות שלה הנוצרות עקב השבירה השונה של צבעים בתחום הנראה. כידוע, ככל שאורך הגל מתקצר כך גדל מקדם השבירה. לכן מקדם השבירה של האדום קטן בהשוואה למקדם השבירה של הירוק. איור 5 מציג על דרך ההפרזה שתי דמויות נפרדות של השמש. הדמות התחתונה בצבע אדום נוצרת כתוצאה משבירה נמוכה יחסית בהשוואה לצבע הירוק. הדמות העליונה נוצרה משבירת האור הירוק.

ניתן להסתייע באיור 2 המציג חפיפה בין שתי הדמויות כאשר הצבע האדום מיוצג ע"י אפור בהיר והצבע הירוק על-ידי אפור כהה. יש לזכור כי עוצמת הצבעים המגיעים לעין הצופה מושפעת משני גורמים:

א. העוצמה היחסית של הצבע בספקטרום השמש. יש לזכור כי בשמש הצבע הירוק הוא בעל העוצמה המרבית. דיון נרחב בנושא זה מובא בפרק 8 במדריך למורה העוסק בקרינת חום.

ב. מידת הפיזור באטמוספרה. בהנחה שהפיזור הדומיננטי באטמוספרה הוא פיזור מסוג ריילי **(Rayliegh)** (ראה דיון בהרחבה פיזיקלית של פרק זה), הרי שמידת הפיזור של הירוק עולה על זו של האדום.

חישוב מדויק של העוצמה היחסית של כל צבע חורג מתחום דיוננו, לכן נניח לצורך הדיון הנוכחי כי עוצמת הצבעים שווה בקירוב. מכאן שאילו היו לנו שני מרכיבים בלבד באור השמש: אדום וירוק, הייתה דמות השמש מתקבלת בדרך הבאה:



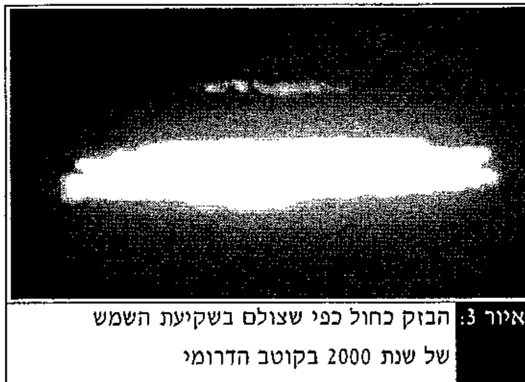
איור 2: דמות השמש המתקבלת לו היה הספקטרום שלה מורכב מאדום וירוק בלבד



למעשה, השמש פולטת ספקטרום בעל רצף צבעים, לכן מראה דמות השמש בשקיעה עשוי להיות מורכב מרצף צבעוני. בדרך-כלל בזמן השקיעה הצבע האדום הוא הדומיננטי, אך בתנאי מזג-אוויר טובים שבהם קיימת צלילות רבה מצד אחד, ואחוזי לחות גבוהים מצד שני, ניתן לקבל הפרדה בין שני הצבעים, ואז מופיע ההבזק הירוק.

כדי לקרב את התמונה למציאות ניתן להוסיף גם דמות של שמש צהובה בין הדמות האדומה לדמות הירוקה. בדרך דומה תופיע הדמות הכחולה מעל לדמות הירוקה.

שאלות לדיון



איור 3: הבזק כחול כפי שצולם בשקיעת השמש של שנת 2000 בקוטב הדרומי

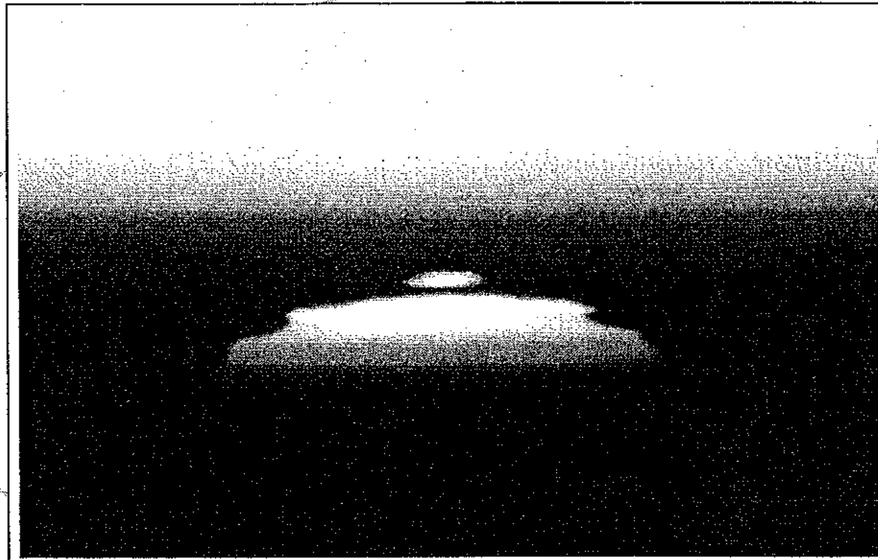
1. הבזק כחול ייתכן, אם יהיו תנאים לכך. כדי לקבל הבזק כחול אנו זקוקים לשבירה חזקה יותר של קרני השמש על-ידי האטמוספרה. התמונה משמאל מראה הבזק כחול, כפי שצולם בזמן שקיעת השמש של שנת 2000 בקוטב הדרומי. האור הירוק והכחול נשברים מעט יותר מהצבע האדום והצהוב, ולכן הם נראים עוד מספר שניות לאחר שקיעת השמש.

2. לקבלת הבזק ירוק נחוצים מספר תנאים המפורטים בשאלה. כדי להבין איך מתקבל ההבזק הירוק ישלהבין כיצד משפיע כל גורם:

- אופק פתוח הנוצר מכדוריות כדה"א: נפיצת האור הלבן נוצרת מכך שלכל אורך גל יש מקדם שבירה שונה. גלגל השמש ייצבע בצבעים שונים בחלקיו שונים. בחלק הגבוה יתקבל אור בעל אורך גל קצר יותר, ובחלק התחתון של דמות השמש יתקבל צבע אדום, בעל אורך גל ארוך יותר. אופק פתוח מאפשר לראות את קרני האור בזווית פגיעה ובזווית שבירה גדולות יותר. בתנאים אלה הדרך האטמוספרית שעובר האור גדולה יותר, ומקדם השבירה של האטמוספרה גדל עבור כל הצבעים. אולם ההבדלים בין מקדמי השבירה של הצבעים גדל. בדרך זו משתפרת ההפרדה בין הצבעים היוצרים את דמות השמש.
- שמים נקיים מזיהום ומאבק דרושים כדי להפחית את מידת פיזור האור. אם האוויר מכיל אבק או זיהום, הוא יפזר את הגלים הקצרים יותר הירוקים ודומיהם. דבר זה יפחית את הסיכוי לקבל את ההבזק. כדי שנוכל לראות את השמש במצבה הנמוך ביותר, צריך קו הראייה להקביל כמעט לקרקע. הקרניים יעברו דרך שכבת האוויר הצפופה ביותר האפשרית. קרניה יישברו במידה מספקת כדי לראות את הצבע הירוק בגובה שבו אנו מצויים.
- לחות באוויר מגדילה את מקדמי השבירה ותורמת לנפיצת האור באטמוספרה.

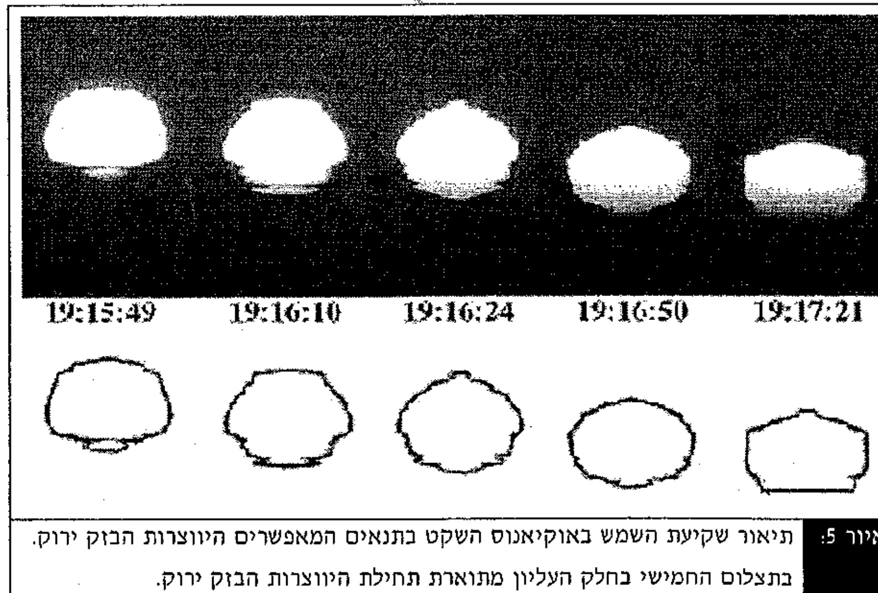


3. שקיעת השמש נמשכת כשתי דקות. הסיבה לכך היא הגודל הזוויתי של השמש כ- 0.5 מעלה וקצב סיבוב כדה״א 0.25 מעלה/לדקה. לעומת משך זמן זה ההבזק הירוק נמשך רק שניות בודדות במקרה הטוב. הסיבה לכך היא התנאים המיוחדים הנדרשים להבזק הירוק שתוארו בשאלה הקודמת: רק כאשר השמש סמוכה מאוד לאופק ובתנאי לחות גבוהים. לכן ההבזק הירוק מופיע רק לאחר שחלק מהשמש שקע, ונוצרו התנאים המתאימים לכך. איור 4 מציג תצלום של ההבזק הירוק.



איור 4: ההבזק הירוק צולם ב-7 בינואר 1996 על-ידי Torrey Pines

איור 5 מתאר את השלבים השונים בשקיעת השמש ואת תהליך של התפרסות הצבעים על פני דמותה. באיור ניתן לראות כי רק לאחר כ-1:40 דקה נוצרו התנאים להבזק ירוק. מספר שניות לאחר השקיעה עוצמת הצבע הירוק יורדת, ושוב לא ניתן לראותו.



איור 5: תיאור שקיעת השמש באוקיאנוס השקט בתנאים המאפשרים היווצרות הבזק ירוק. בתצלום החמישי בחלק העליון מתוארת תחילת היווצרות הבזק ירוק.



שאלות להרחבה

1. כדי לענות על שאלת היתכנות ההבזק הירוק על נוגה או הירח יש להכיר את הרכב האטמוספרה עליהם (ראה את הפרק על מערכת השמש, שבו מתומצתים מאפייני גופים במערכת השמש). על-פני הירח אין למעשה כל אטמוספרה. האור המגיע מהשמש אינו עובר מתווך שקוף אחד למשנהו, אלא ממשיך בקו ישר ולא נשבר, ולכן גם לא עובר נפיצה. לכן ההבזק הירוק לא יכול להתקבל על הירח. לעומת זאת נוגה היא פלנטה עם אטמוספרה צפופה מאוד ואטומה לאור. לכן גם על נוגה אין אפשרות לקבל את ההבזק הירוק. לכך דרושים קו ראייה נקי אל האופק ואטמוספרה צלולה.
2. מרחק השמש מכדה"א כ-150,000,000 ק"מ. האור המגיע מהשמש חולף על פני מרחק זה ב-8 דקות. כאשר רואים את דמות השמש בסמוך לאופק, השמש עצמה נמצאת כבר שמונה דקות מתחת לדמות זאת. ניתן לחשב את זווית השמש מתחת לאופק בשל הזמן שחלף עד הגיע האור מהשמש. כדה"א סובב רבע מעלה לדקה, תוך שמונה דקות הוא ייסוב שתי מעלות. מכאן שהשמש מצויה שתי מעלות מתחת לאופק. גורם נוסף המשפיע על מיקום השמש מתחת לאופק הוא שבירת אור השמש באטמוספרה. רק דמותה נראית נוגעת באופק. השפעה זו מוערכת בחצי מעלה. לכן כאשר אנו צופים בשמש סמוך לשקיעה, אנו צופים בדמותה. השמש עצמה מצויה כבר 2.5 מעלות מתחת לקו האופק.



פעילות 14: צבע השמים

פעילות זו עוסקת בנושא מסקרן, שאינו זוכה לטיפול מסודר בבית-הספר. הצגה פיזיקלית מלאה של פיזור האור באטמוספרה חורגת מהדיון עם תלמידי בית-ספר תיכון. בהרחבה הפיזיקלית בהמשך פרק זה תפגוש תיאור של סוגי פיזורים שונים של האור באטמוספרה. הפעילות המוצעת מאפשרת היכרות עם המושגים הקשורים בפיזור ותיאור איכותי של התופעה. הפעילות מורכבת מארבעה חלקים:

א. מה דעתך?

ב. הדגמה של פיזור באמצעות קרני לייזר - 15 דקות.

ג. בניית מודל של פיזור האור - 30 דקות.

ד. השפעת אורך המסלול האטמוספרי של אור השמש על צבע השמים - 10 דקות.

בסיום כל פעילות מומלץ לערוך דיון מסכם לצורך הבהרת המושגים שנלמדו ומתן דוגמאות.

מה דעתך?

למרות הקושי לצפות להסברים פיזיקליים מסודרים לצבע הכחול של השמים, הרי שיש לתלמידים עמדה בנושא זה. לתלמידינו השמים בעלי הצבע הכחול המוכר כל-כך נראים כאילו היו שם מאז ומעולם. תלמידים רבים מייחסים את הצבע הכחול להשתקפות הים בשמים. האמנם? נסה לשאול את התלמידים מהו אם כן הגורם לצבע הכחול של הים. התשובה שמתקבלת די הרבה היא ש"זה בגלל השתקפות השמים" ובכן, מי קדם למי? נזכיר כי חשוב לשמור על סדר שבו ראשית כול תלמיד כותב את עמדתו, לאחר מכן מתבצע דיון בקבוצות קטנות, ורק לאחר מכן דיון כיתתי. בדיון הכיתתי המורה מסכם את עמדות התלמידים בלי להוסיף משלו.

1. הפיזור השולט בשמים הוא פיזור של מולקולות קטנות, המתואר בעזרת המודל של רלאיי, המתואר בהרחבה הפיזיקלית. מודל זה קובע כי פיזור האור נמצא ביחס ישר להופכי של אורך הגל ברביעית. לצורך הדיון נניח כי אורך גל אדום אופייני הוא 6,700 אנגסטרם, ואורך גל כחול אופייני הוא 4,500 אנגסטרם. לכן היחס ביניהם הוא: 1.89 = 4,500 / 6,700 נעלה יחס זה בחזקה רביעית ונקבל 4.91 כלומר עוצמת הפיזור של הצבע הכחול באטמוספרה גדולה פי חמישה בקירוב מעוצמת האור האדום. עוצמת המרכיב הכחול באור השמש גדולה מעוצמת המרכיב האדום. שתי עובדות אלה הן הגורמות לצבע הכחול של השמים.

2. צבעם הכחול של השמים אינו קבוע. גורמים רבים משפיעים על צבע השמים: עננות, אובך, מיקום השמש בשמים, לחות, טמפרטורה. במצב יציב שבו אין עננות והשמש אינה סמוך לאופק, ייראו השמים כחולים. תנאים כאלה קיימים בישראל כשבעה חודשים בשנה. בשאר חלקי השנה קיימת עננות או סופות חול הגורמות להקטנת כמות אור השמש החודרת את האטמוספרה.

3. לא ברור כמה מתלמידיך יודעים את העובדה שאין אטמוספרה בירח. יש להניח שאלה שעובדה זו מוכרת להם, יצליחו להעריך ששמי הירח נראים שחורים גם ביום. האחרים יעלו השערות שונות וביניהן, איך לא? את ההשערה ששמי הירח כחולים כמו בכדה"א.



חלק א: מעקב אחר אור לייזר

אור לייזר הוא כלי נוח מאוד למעקב אחר מסלול קרני האור. הוא אינו מתפזר, אלא נותר באלומה צרה המתרחבת במידה מועטה יחסית.

לפעילות דרושה כשעה.

הציוד הדרוש הוא:

- פנס רגיל
- כלי זכוכית שקוף
- מקור לייזר
- אבקת גיר וחלב

נפעיל את מקור הלייזר. כתם האור האדום מופיע על הקיר ממול, אך לא נוכל לראות את המסלול שעבר האור. ניתן רק לשער שמסלול הקרן היה קו ישר בין מקור הלייזר אל הכתם. מדוע רואים את הכתם על הקיר ולא בדרך אליו? הסיבה היא שהקיר הנמצא בדרכה של הקרן מפזר את האור הפוגע בו. אם נוכל לשים סדרה של "חתיכות קיר" קטנות לאורך המסלול, נוכל למצוא היכן עברה הקרן. זהו בדיוק תפקיד אבקת הגיר נדליק את מקור הלייזר ונפנה אותו אל הקיר נאפיל את החדר ונפזר אבקת גיר במסלול המשוער של הקרן. גרגרי האבק יהוו מוקדי פיזור לאור, ונראה את האור מפוזר בכל פעם שיפגע בגרגר אבק. באופן טבעי נחבר את כל נקודות האור האלו לקו ישר העובר ממקור הלייזר אל כתם האור שבקיר. אפשר לבצע את ההדגמה גם באמצעות כלי זכוכית המלא מים ובו מספר טיפות חלב כגורמים מפזרים.

חלק ב: מודל פיזור האור באטמוספרה

לצורך הפעילות רצוי להסתייע בקרני השמש המכילות בדיוק את ספקטרום השמש. אבל תנאי זה מטיל מגבלה גדולה על מועד העברת הפעילות ומיקומה, מאחר שדרוש חדר עם חלון הפונה החוצה בשעה שהשמש מאירה לכיוון החלון הספציפי הזה. אם אין חדר כזה בנמצא, אפשר לייצג את קרני השמש על-ידי שימוש בנורה חשמלית. יש לזכור שלנורות חשמליות אין מרכיב כחול וסגול בעוצמה הדומה לזו הנמצאת בשמש. נורת הלוגן בהספק של 500 וט מספקת את האור הקרוב ביותר לאור השמש. מכאן שיש שני גורמים שעלינו לייצג במודל זה: קרני השמש והאטמוספרה. עם כל הכבוד המתבקש, קשה לדחוס את האטמוספרה לבקבוק של משקה קל ואת השמש לנורה חשמלית, לכן יש להיות ערים לעובדות אלו ולא לצפות לקבל שמים כחולים במעבדה. יש להסביר לתלמידים את מגבלות המודל. ניתן ממגבלות אלו לרדות דבש בדמות דיון על מגבלות הניסויים במעבדות, ועד כמה מוגבל וקשה הוא המחקר בפיזיקה ובמדע בכלל.

הפעילויות שבחוברת מדגימות את פיזור האור באטמוספרה שכידוע, עבה יחסית למה שניתן להכניס לכיתת לימוד ממוצעת. לכן השתמשנו בתעלול קטן - ייצגנו את גורמי הפיזור של האטמוספרה בעזרת טיפות חלב, שהוספו אל בקבוק המים. יש להיזהר לא להגדיל מדיי את ריכוז החלב במים, שאם לא כן נקבל פיזור-יתר שלא יפיק את התוצאות המקוות. לכן אנו ממליצים להוסיף את טיפות החלב מעט בכל פעם ולעקוב אחר התוצאות המתקבלות. אם נסתכל כעת אל מקור האור **מבעד לנוזל**, נראה את המקור מקבל צבע כתום יותר ויותר לכיוון האדום, ככל שריכוז החלב עולה.



יש לשים את מקור האור מול הבקבוק, ואת הצבע הכחול יש לחפש **בניצב** למסלול האור הנפלט מהנורה. את הצבע הכחול של השמים אנו רואים מגיע מנקודות המפזרות אור בניצב לכיוון המקורי של הקרן. בשל קוטרם הקטן יחסית של מקלות הדבק, הצבע הכחול אינו בולט. ניתן לשפר אפקט זה על-ידי החלפת מקלות הדבק בדיסקה של דבק מותך. ניתן ליצור אותה במחבת קטנה או בתבנית אלומיניום עגולה בקוטר של 15 ס״מ. נקבל עיגול דבק בעובי רצוי, בין 1 ל-15 מ״מ. יש להאיר את דיסקת הדבק מאחור, כאשר מקור האור **אינו צמוד**. בעובי מתאים (1-2 מ״מ) יתקבל הצבע הכחלחל בשולי העיגול.

בפרק זה נראה הדגמות של קבלת צבע כחול עקב פיזורן של הקרניים בתווך כלשהו.
פרק-הזמן הדרוש לפעילות הוא שעה עד שעתיים.
הציוד הדרוש לפעילות:

- 3 בקבוקי משקה קל שקופים בעלי חלק תחתון בצורת גליל חלק
- מקור אור לבן, רצוי הלוגן
- מים ומעט חלב

בפעילות זו נשחזר את גורמי הפיזור של האטמוספרה **לתוך** בקבוקי המים. נקבל את הצבע הכחול כתוצאה מפיזור האור העובר במים עם מספר טיפות חלב מעורבבות בהם.

1. מעבר של קרן אור לבנה דרך בקבוק שקוף לא ישנה את צבע האור. הבקבוק ריק ואין מוקדי פיזור בדרכה של הקרן. שאלה זו מהווה מעין בסיס, ממנו נצא אל חקירת פעולת חומרים שונים על קרן האור.
2. כעת הבקבוק מלא מים. לרוב המים שקופים דיים, ונקיים דיים כדי שלא נקבל פיזור או בליעת אור משמעותית בשכבת מים בעובי של בקבוק מים. גם זהו בסיס כדי להשוות אליו את השתנות צבע האלומה עם הוספת מוקדי פיזור אל המים בדמות מולקולות החלב.
3. כעת נתחיל להוסיף למים את החלב שיפזר את האור. הקפד לנער היטב את הבקבוק כדי לקבל פיזור אחיד של מולקולות החלב במים. נוסיף את החלב בזוגות של טיפות. נעקוב אחר השתנות צבע הצבעים המופיעים בבקבוק. שים לב שהפיזור יגרום להופעת צבע כחול **מהצד**, מאחר שכמו שנראה בפרק ההסבר הפיזיקלי של התופעה, הצבע הכחול מפוזר הצדה.
4. נשים לב לצבע שעובר את המים. איזה צבע נקבל מעברו השני של הבקבוק? אם המרכיב הכחול של האור מפוזר תוך מעברו במים, יישארו מהאור הלבן רק המרכיבים שלא פוזרו - כלומר המרכיב האדום של האור. כאן נחזור ונדגיש את הצורך בשימוש במקור אור המכיל די אור כחול, כדי שכמות האור הכחול המפוזר תהיה משמעותית באופן שאפשר יהיה לראות אותו.

בניסוי שערכנו בהשתלמות מורים התקבלו מספר המלצות לשיפור הניסוי המתואר בחוברת.

1. יש להקפיד לקחת בקבוק שקוף של שתייה קלה או מוצרי חלב. צריך להקפיד שהדפנות יהיו בצורת גליל, כך שלא ייווצרו תופעות של שבירה והחזרה מעבר לאלה הקיימות בגליל.
2. מומלץ להניח את הבקבוק אופקית, ולא אנכית כמו בחוברת לתלמיד. האוריינטציה הזו נתנה עובי שכבת מים גדולה, כך שההבדל בין הצד הקרוב לפנס לצד הרחוק ממנו ברור מאוד.
3. בבקבוק שנפחו 1.5 ליטר עברנו לטפטוף של ארבע טיפות בכל פעם על מנת לקצר את התהליך. בבקבוקים בנפח קטן יותר ניתן לטפטף מספר טיפות ביחס מתאים לנפח.
4. מקור האור הוא נורת הלוגן בהספק של 500W, הכלי הוא בקבוק שקוף.



מספר טיפות חלב	צבע הנוזל בצד הקרוב לפנס התבוננות מצד הבקבוק סמוך לבסיס	צבע הנוזל בצד הרחוק מהפנס התבוננות מצד הבקבוק סמוך לפקק	צבע האור מאחורי הבקבוק התבוננות אל מקור האור מכיוון הפקק אל הבסיס
4	תכלכל-אפרפר	תכלכל-אפרפר	לבן
8	תכלת-אפור מעט כהה יותר	תכלת-אפור	בזי
12	תכלת-אפור מעט כהה יותר	תכלת-אפור מתחיל גוון כתום	בזי
16	תכול	תכול - כתום בהיר	כתום בהיר
20	התכול בולט יותר	תכול עם רכיב כתום בולט	כתום כהה מעט יותר
24	תכול	כתום בהיר	כתום
28	תכול ברור	כתום כהה מעט יותר	כתום
32	תכול ברור	כתום המתחיל קרוב יותר לפנס	כתום
36	תכול עם גוון כתום קל	הכתום המתחיל קרוב לפנס	כתום ברור
40	כתום בהיר מאוד	כתום	כתום כהה

טבלה 1: שינוי צבע האור ב"בקבוק החלב", מודל לפיזור האור באטמוספרה

דיון מסכם

צבע השמים בזריחה ובשקיעה אדום בדרך כלל. זהו הצבע שנותר בקרני השמש המגיעות אלינו, לאחר שעברו שכבת אטמוספירה עבה. שכבה זו פיזרה את מרבית הצבעים האחרים המרכיבים את ספקטרום השמש. הפיזור באטמוספרה דומה עקרונית ל"מודל החלב". כפי שראינו כאשר הבטנו במקור האור מבעד לבקבוק המים עם החלב.



שאלות להעשרה

בחלק זה ניישם את ההסבר שלמדנו לסיבות לקבלת צבעים שונים באטמוספרה לתופעות שנראו במהלך הזמן:

1. התפרצות הר הגעש פינטובו שחררה אל האטמוספרה כמויות עצומות של אבק דק, שהיווה מוקד פיזור מצוין לאור. השקיעות נראו אדומות במיוחד, מאחר שהאבק פיזר את כל הצבעים האחרים ביעילות גבוהה במיוחד.

2. העשן שהעלו בארות הנפט היו מורכבים מחלקיקי פיח שחורים וגדולים יחסית, שפעלו יותר כבולעי אור ולא כמוקדי פיזור ריילי, לכן לא שינו את צבע האור, אלא את עוצמתו.

3. רסיסי המים הם חלקיקים גדולים יחסית, והם אינם מפזרים את האור, אלא שוברים אותו כפעולת מנסרה זעירה. מאחר שכל מנסרה מכוונת לכיוון אחר, מכל נקודה שנסתכל יופנו אלינו קרני אור הנפוצות ממנסרות רבות המצויות באוריינטציות שונות. אל עינינו יגיע אור בכל צבעי הקשת מעורבבים, שהעין תפרש כצבע לבן. זו הסיבה לצבע הלבן של ענני הנוצה.

4. המים בולעי אור יעילים מאוד, למעשה, הים בולע כ-95% מהאור הפוגע בו. לו צילמנו את כדה״א מהחלל ללא האטמוספרה, היו הימים מופיעים בצבע שחור. הצבע הכחול של הים נגרם מהחזרת האור המגיע מהשמים. מאגרי המים מחזירים את צבע השמים. צבעם נראה כהה יותר מאחר שהמים אינם שטוחים לחלוטין, אלא מחוספסים. עקב הגלים היוצרים פיזור בלתי מסודר, נראים מהחלל אזורים כהים יותר על פני המים בהשוואה ליבשה.

5. בהעדר אטמוספרה על הירח אין בשמיו גורמים מפזרים, ולכן צבע השמים בירח שחור.

חלק ג: צבע השמים בצהריים ובבוקר

בפעילות זו ננסה לראות את השפעת המרחק שעוברת קרן האור באטמוספרה על צבע השמים המתקבל. זוהי הדגמה איכותית המאפשרת לראות כיצד מתקבלת עדיפות לצבע האור האדום במעבר דרך תווך מפזר.

הציוד הנדרש לביצוע הפעילות:

- גליל ״דבק חם״
- מקור אור חזק בעל מרכיב כחול משמעותי הלוגן

מסלול אור השמש בשעות הצהריים מיוצג על-ידי הגליל הקצר שאורכו 5 ס״מ.

מסלול אור השמש בשעות הבוקר או הערב מיוצג על-ידי הגליל שאורכו 15 ס״מ.



מומלץ ליצור מהגלילים דיסקות דבק בעובי שונה של עד 15 מ"מ ולראות את השתנות צבע הדיסקה, כאשר נקרין עליה אור בפנס. כאשר נביט במקור האור, נראה אותו הולך ומאדים, ככל ששכבת הדבק עבה יותר. אולם בדיסקה בעובי מסוים נראה את האזור מסביב למקור האור מקבל צבע כחלחל כמו השמים מסביב לשמש בשעת הצהריים. כאשר עובי הדיסקה יגדל מעבר לזה, נתחיל לראות האדמה של הדיסקה האופיינית למעבר אור דרך שכבה עבה של אטמוספרה. אם נשתמש לגליל ארוך יחסית כ-5 ס"מ, נקבל האדמה ברורה של הגליל.

ניסוי זה בשילוב עם הניסוי הקודם הוא פתח לדיון בנושא הפיזור, שממנו ניתן לצאת לדיון בנושאים המופיעים בהרחבה הפיזיקלית, כגון:

א. סוגי פיזור בין אור לחומר
ב. הקשר בין צבע האור או אורך הגל לבין מידת הפיזור
ג. כיוונים של פיזור האור
ד. מודלים שונים של פיזור האור
ה. הקשר בין גודל החלקיקים המפזרים לבין סוג הפיזור
ו. מבנה האטמוספרה ופיזור אור באטמוספרה



הרחבה פיזיקלית -

אינטראקציה של אור באטמוספרה

מבוא

באטמוספרה יש מולקולות גז מסוגים שונים ושינויי טמפרטורה גלובליים (על נפחים גדולים) ומקומיים (על נפחים קטנים). שינויים אלו מעוותים את התמונה המתקבלת בשעה צפייה בעצמים שמימיים, שהאור שלהם עובר דרך כל שכבות האטמוספרה.

בעיה קשה העומדת בפני האסטרונום היא קיום האטמוספרה כשמיכה עבה התוצצת בינו לבין העצמים שאותם הוא חוקר רק בעזרת האור. שמיכה זו גורמת לעיוות הצבעים וצורתם. כל עיוות המתקבל מצפייה בגרמי שמים עלול להעביר אל החוקר מידע מוטעה ולגרום לו להגיע למסקנות מוטעות. במהלך הזמן למדו החוקרים להבין איזו תופעה קשורה בעצם הנצפה, ואיזו תופעה היא עיוות הנגרם ע"י האטמוספרה. ידע זה סייע במידה רבה להתגבר עליהם.

אחד העיוותים הברורים ביותר הוא שינוי צבע השמש במהלך נדידתה על פני כיפת השמים. במהלך הלילה צבע השמים שחור או כחול כהה מאוד. עם עלות השחר, הצבע הופך בהיר יותר ויותר והשמים מקבלים גוון כתום עד הזריחה, שבה השמים כתומים. זמן-מה אחר עלות השמש אין ולו רמז לצבע הכתום שצבע את השמים בזריחה, והשמים נצבעים בתכלת עד כחול בהיר. השמש שהייתה כתומה בזריחה, משנה את צבעה לצהוב-לבן בוהק ומסנוור. כך עובר לו היום, והשמש נראית שטה בשמים ממזרח למערב. בשעות הערב שוב נצבע האופק, הפעם ממערב, בצבע כתום עז. השמש הופכת כתומה יותר ויותר, ויש ימים שצבעה אדום ממש, עד שהיא נעלמת מעבר לאופק.

תופעה שמצריכה תשומת לב היא שגם לאחר השקיעה ובטרם זריחה כבר יש אור. תופעה זו וגם הצבע האדום של השקיעה מקורם בפיזור אור השמש העובר באטמוספרה. אולם גם במהלך היום יש פיזור של אור השמש, והוא מתבטא בצבע הכחול של השמים.
צבע כחול זה, למשל, מונע מאתנו לראות את הכוכבים המצויים בשמים בשעות היום. הוא אף גורם לאור השמש המגיע אלינו להכיל פחות אור כחול מכפי שנשלח אלינו מהשמש.

בלילה הכוכבים נראים לנו מנצנצים. האם הם באמת משנים את מידת ההארה שלהם? חלקם אף משנים את צבעם. מה גורם לכוכבים להיראות כך? גם תופעות אלו קשורות בקיום האטמוספרה ובפיזור אור העובר דרכה.

הבנת הסיבה לצבע הכחול של השמים יש עמה ערך מוסף בתחומים רבים בפיזיקה, באופטיקה ובאסטרונומיה. אחד הפתרונות לבעיה שמציבה האטמוספרה בפני החוקרים, היה מיקום טלסקופים באזורים מבודדים (ללא זיהום אוויר) וגבוהים מאוד (על פסגות הרים גבוהים). פתרון מתוחכם ויקר מאוד הוא שיגור טלסקופ לחלל, כך שינוע מעל האטמוספרה כלוויין ויצפה בכוכבים ללא הפרעה.



ילידי איי האוקיאנוס השקט האמינו שהשמים הם כיפה כחולה שלה שני פתחים: אחד במזרח ואחד במערב. דרכם נכנסים ויוצאים גרמי השמים ואוניות שהיו מבקרות באיים שלהם. הצבע הכחול הוסבר ביופיו של הטבע שניתן לבני-האדם על-ידי האלים. גישה רומנטית זו נראית לנו כיום ילדותית ולא מדעית. אולם אם נשאל בני-אדם, מבוגרים וילדים, משכילים ובורים גמורים, נקבל אוסף תשובות שלחלקן יש קשר. חלקן נכונות אבל הרוב המכריע של הנשאלים ייתן תשובות מתשובות שונות.

צבע השמים הכחול נראה לנו כדבר מובן מאליו. אין רבים המהרהרים מדוע הדבר כך. השמים נמצאים מעל ראשינו מאז היוולדנו ולאורך כל מהלך החיים. יש דברים המובנים מאליהם ולא נראים כמצריכים דיון נוסף. לרוב הנשאלים יש הרגשה שצבע השמים קשור באטמוספרה העוטפת אותנו. אולי זהו הצבע של החמצן או דבר-מה אחר. במקרים נוספים חשים הנשאלים קשר לצבע הכחול של הים וההסבר ניתן על-ידי השתקפות צבע הים בשמים. גישה זו מעוררת את השאלה מהיכן מקבל הים, את צבעו הכחול, ואז לא אחת יש חזרה להשתקפות צבע השמים בים אז מה קדם למה? כחול השמים למים או להפך?

חשוב להדגיש שעל השאלה לגבי הסיבות לצבע השמים חלוקות הדעות גם בקהילה המדעית. שתיים מהן נאבקות על הבכורה ועל הכרת הקהילה המדעית, אולם יש הסכמה כללית שמדובר בתופעת פיזור המתרחשת באטמוספרה. הסבר אחד הוא של לורד ריילי הדבר פיזור האור על-ידי מולקולה בודדת, וההסבר השני ניתן על-ידי שני פיזיקאים: אלברט אינשטיין ופולני בשם סמולוכובסקי וידוע כמודל אינשטיין-סמולוכובסקי. המודל המקובל יותר הוא מודל ריילי, ולכן נפרט כאן עליו ואת מודל אינשטיין-סמולוכובסקי נזכיר לאחר מכן.

מהו בעצם פיזור?

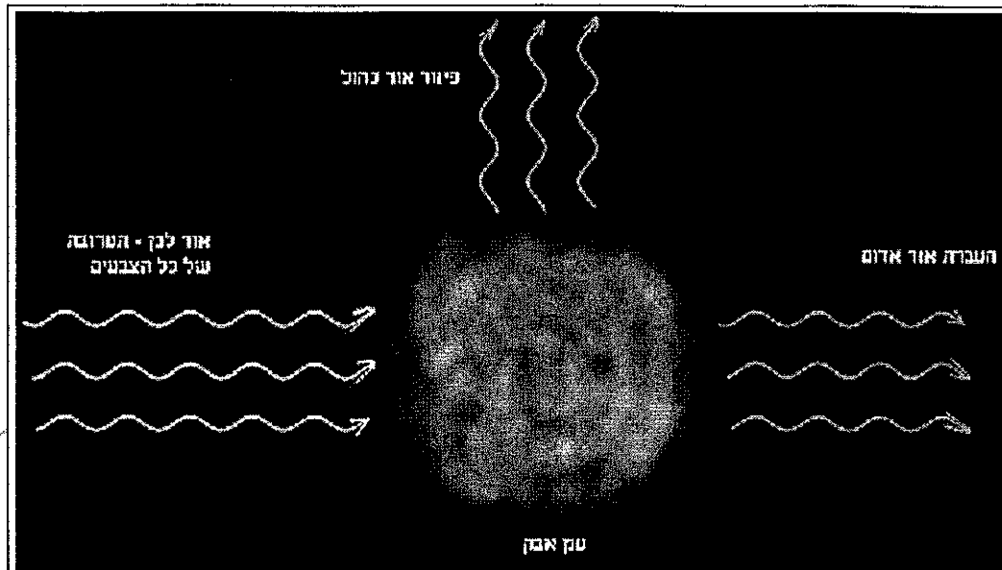
פיזור הוא תופעה המצויה כמעט בכל מקום שאליו נפנה: אנשים הנוסעים באוטובוס מתפזרים איש-איש לדרכו עם הגעת האוטובוס ליעדו, תלמידים המתפזרים מהכיתה עם הישמע הצלצול, כן מתפזרים צעצועים של ילד המשחק בהם. לכל פיזור יש הגוף המפוזר (צעצועים) והגוף המפזר (ילד).

פיזור אור הוא מצב שבו אור המגיע כחבילת גלים אל מוקד הפיזור, לא יכול להמשיך הלאה כאותה חבילת גלים, אלא מופרד במידה זו או אחרת למרכיביו, או לפחות אינו ממשיך בכיוון המקורי של הקרן. תופעה מוכרת בפיזור אור באטמוספרה היא הופעת קשת בשמים בימים גשומים. האור הלבן המגיע מהשמש פוגע בטיפות המים המצויות באטמוספרה בשעת הגשם ומפוצל למרכיביו - כל צבעי הקשת.

דיברנו כבר על צבע השמש בשעת השקיעה. צבע השמים הכחול במהלך היום שגם מקורם בפיזור אור וקיום אור גם לאחר שקיעת השמש. אך מהו התהליך הפיזיקלי המתרחש במהלך הפיזור?

הבה נערוך ניסוי: נקרין אור לבן על ענן אבק עדין ביותר (גודל גרגרים של כאנגסטרם אחד), ונקבל את המתואר באיור הבא:





איור 6: אור לבן המוקרן לעבר ענן אבק עדין ביותר גורם לפיזור האור בעל אורך הגל הקצר יותר בניצב לכיוון הקרן המקורית

כאשר אור פוגע בחומר, הוא מוחזר או נבלע בחומר. במקרה הזה אין תהליך של בליעה, אלא רק של פיזור האור הכחול, שהוא בעל אורך גל קצר יותר, בשעה שהאור האדום בעל אורך הגל הגדול יותר עובר **כמעט** ללא הפרעה. חשוב לזכור שיעילות הפיזור גדלה ככל שאורך הגל קטן. כלומר גם אורכי גל ארוכים יותר יפוזרו, אם כי תידרש שכבת אטמוספרה עבה יותר כדי שהפיזור יורגש.

מודל תיאורטי לפיזור

פיזור הוא החזרת אור ממשטח כלשהו לאו דווקא לכיוון שממנו הגיע האור. מבחינים בשלושה סוגי פיזור קיימים:

פיזור אופטי: עבור חלקיקים מפזרים גדולים מאוד, גודלם מעל מאית מ"מ.

פיזור מי (Mie): עבור חלקיקים מפזרים בין 10^{-2} ל-10^{-4} מ"מ. בפיזור זה האור מתפזר לפי: $\frac{1}{\lambda^{2}}$

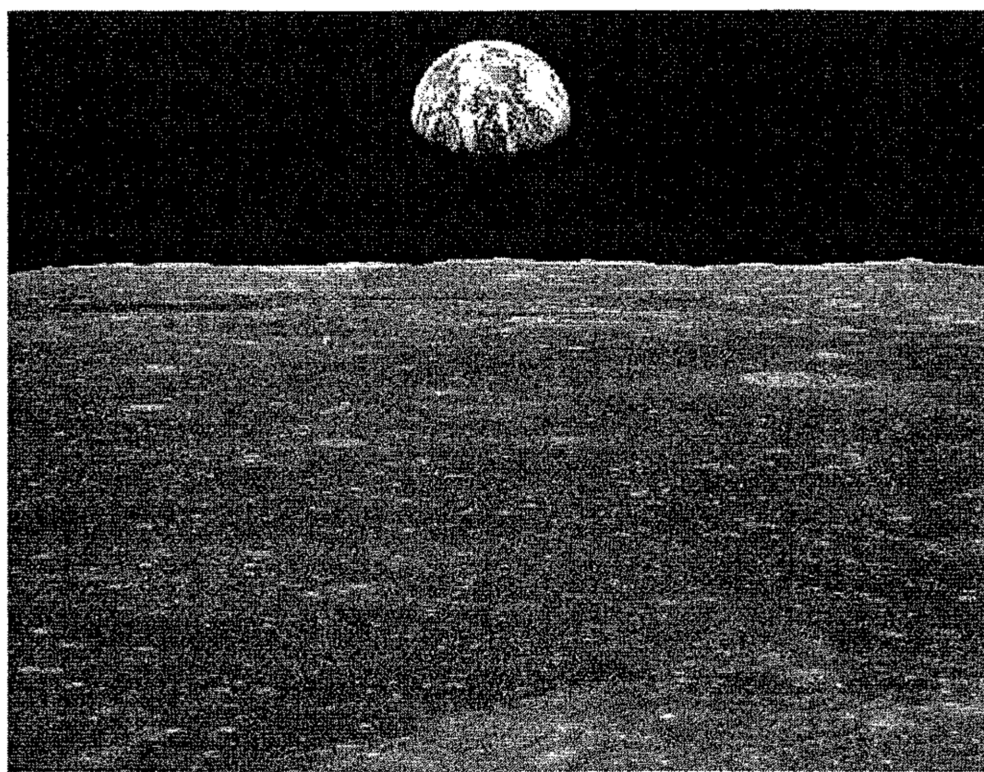
פיזור ריילי (Rayliegh): מתרחש כאשר החלקיקים המפזרים קטנים מ-10^{-4} מ"מ.
בפיזור זה האור מתפזר לפי: $\frac{1}{\lambda^{-4}}$

האם פיזור אור על-ידי חלקיקים באטמוספרה הוא אכן האחראי לצבעם הכחול של השמים?

הבה נבחן מה קורה לגוף שמימי שאין לו אטמוספרה: הירח.



הירח קטן במסתו פי 81 מכדה״א, ולכן כוח המשיכה שלו לא היה חזק דיו על מנת לשמור את האטמוספרה והיא ״ברחה״ לו. לירח חסר האטמוספרה יש שמים שחורים גם במהלך שעות היום. חוסר האטמוספרה גורם לכך שלא תהיה הסטת אור מכיוונו המקורי שגורם לצביעת השמים.



איור 7: שמי הירח שחורים ביום בשל העדר אטמוספרה, שתפזר את אור השמש. בהשוואה אליו ניתן לראות את צבעיו של כדה״א, שמקורם בתהליכי פיזור המתרחשים באטמוספרה הארצית.

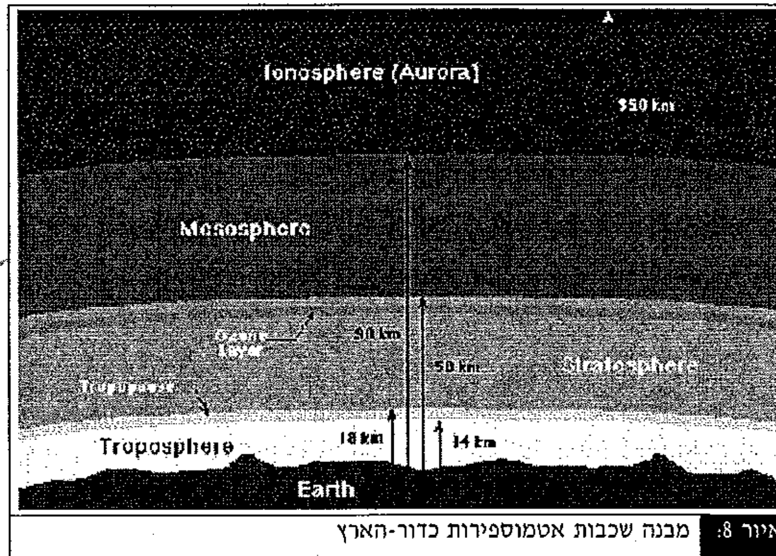
בתמונה 7 שצולמה על-ידי צוות האסטרונאוטים של אפולו 11, נראה כדה״א בצבעי לבן וכחול. הסיבה לצבע הלבן היא החזר אור מהעננים. הצבע הכחול מקורו בפיזור האור באטמוספרה. אנשים רבים נוטים לחשוב כי מקורו של הצבע הכחול הוא החזר האור מהמים שמכסים את מרבית שטחו של כדה״א, אך זוהי טעות. מקורו של הצבע הכחול הוא בפיזור האור באטמוספרה.

למרות שהצילום בוצע בזמן שהשמש האירה את פני הירח, שמי הירח שחורים. שעת הצילום היא שעת יום, שהרי פני הקרקע נראים היטב בצבעיהם האמיתיים. השמים נראים בצבע שחור עקב העדר אטמוספרה בשמי הירח, ולכן אין מוקדי פיזור שיגרמו לשמים להיראות.

כדי להבין את המודל העומד מאחורי הפיזור ואת התלות שלו באורך הגל, נכיר תחילה בקצרה את האטמוספרה ואת מרכיביה.

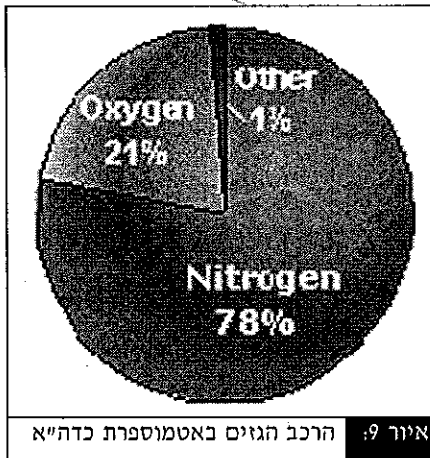


אטמוספרת כדה"א



איור 8: מבנה שכבות אטמוספירות כדור-הארץ

האטמוספרה של כדה"א מורכבת ממולקולות דו-אטומיות בדרך-כלל. צפיפות האוויר הולכת ויורדת, ככל שעולים בגובה מפני הקרקע:



איור 9: הרכב הגזים באטמוספרת כדה"א

האטמוספרה מורכבת מ-78% חנקן, 21% חמצן, כמעט אחוז אחד של ארגון ותוספות אחרות כמו אדי מים בריכוז של 0% עד 7%, גזי "חממה" כמו אוזון (0.01%) ודו-תחמוצת הפחמן (0.1%). בנוסף למולקולות הגז המרכיבות את האטמוספרה, היא מכילה גם אבק ומוצקים אחרים פחממניים ואחרים.

קוטר אטום מימן הוא מסדר-גודל של אנגסטרם אחד. כלומר מולקולה תהיה מסדר גודל זה ומולקולות גז אחרות לא יהיו גדולות בהרבה. לכן גודל של מולקולת גז היא מסדר הגודל הגורם לפיזור ריילי (החלקיק המפזר קטן בהרבה מאורך הגל).
גרגרי אבק הם כבר גדולים יותר, והם מסדר-גודל של מיקרונים, והם גורמים לפיזור Mie, וכמוהם גם אדי המים.

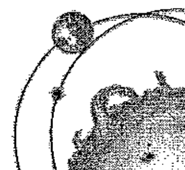




האטמוספרה

פרק ז': מערכת השמש





פעילות 16: ארץ, ירח שמש

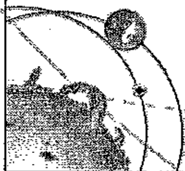
מבוא

אדם החי על פני כדה"א מתבונן לעתים למרחק של סנטימטרים בודדים, כאשר הוא קורא או בוחן פרטים זעירים. לעתים הוא צופה למרחק של קילומטרים אחדים. התלמיד המתבונן אל העולם מנקודת הראות של כדה"א, המחופה בשכבת מגן אטמוספרית, שממדיו הם ממדים "אינטימיים", יתקשה לדמיין איך מסודר העולם כאשר חורגים אל סדרי-גודל אחרים. מושגים רבים משתנים, לא רק מושג המרחק או המרחב משתנה, כאשר מתחילים לחקור את ממדי מערכת השמש, אלא גם מושגים הקשורים בצפיפות, בטמפרטורה, בלחץ, במהירות, בקרינה, בכוחות ועוד. במידה מסוימת האדם הבוחן את מרחבי מערכת השמש דומה לאדם היוצא לטיול בארץ זרה ובלתי מוכרת, שכל מערכת המושגים והחוקים המתקיימים בה שונה מזו המוכרת לו. היכולת להתחבר אל חוקי אותה מדינה ונופיה עוברת דרך המראות המוכרים לו מארץ המולדת. למרות השוני הגדול בין שתי הארצות לא ניתן להבין את המקום החדש בלי להישען על הידע, שנצבר קודם במקום אחר ובנסיבות שונות. אחת הדרכים לקשר בין שתי המציאויות, הישנה מול החדשה, המוכרת לעומת הבלתי ידועה, היא בעזרת מודל, שעליו ניתן לבצע פעילויות והדמיות.

מה דעתך?

מטרת פעילות זו להעריך את העמדה הראשונית של התלמידים לגבי היחסים שבין הקטרים של שלושת גרמי השמים: ארץ, ירח, שמש. כתושבי הארץ הקרובים אליה, יש נטייה אצל תלמידים רבים לייחס לארץ קוטר גדול יותר בהשוואה לשני גרמי השמים האחרים. מאידך רבים מהם מודעים לכך שהארץ סובבת סביב השמש, ולכן היא קטנה יותר. נדירים המקרים שבהם תלמידים מודעים עד כמה זעירה הארץ בהשוואה לשמש. לעתים זוהי ידיעה מתמטית בלבד, אך כאשר הם צריכים לתרגם זאת לייצוג גרפי, הפרופורציות משתנות, והם נוטים לצייר את הארץ גדולה יותר.

הפעילות מתחילה בהזדמנות הניתנת לתלמידים להעריך את גודלה של הארץ בהשוואה לשמש. בפרק הראשון במדריך דנו בהרחבה בחשיבות השמש, בתהליכים המתרחשים בשמש ובהערכת הספק השמש. מרבית התלמידים מודעים לתפקיד המרכזי, שהשמש ממלאת בקיום החיים על פני כדה"א. חלקם מכירים את המודל ההליוצנטרי, שלפיו הארץ נעה סביב השמש. מאידך השמש מופיעה בשמים בגודל זוויתי הדומה לגודל הזוויתי של הירח, כחצי מעלת קשת, ונראה כי השמש היא זו הנעה סביב הארץ בתנועתה היומית ממזרח למערב. בנושא זה מגוון הדעות הוא רחב מאוד ורצוי לאפשר לתלמידים להביע עמדות שונות. החל מהגישה הרואה בארץ את הגוף המרכזי ביקום, ולכן הגוף הגדול מבין שלושת הגופים המעסיקים אותנו בפעילות זו, וכלה בגישה המציגה את כדה"א כגוף בעל קוטר זעיר בהשוואה לשמש. חשוב שהתלמידים ינמקו את עמדתם לפני שימשיכו בביצוע הפעילות. תהליך ההנמקה יתבצע בשלושה שלבים: א. בצורה אישית, כאשר כל אחד רושם את עמדתו במחברתו. ב. בדיון קבוצתי, 3-2 תלמידים דנים ביניהם ומנסים להגיע להסכמה. ג. דיון כיתתי שבו נשמעות הדעות השונות שעלו בקבוצות.

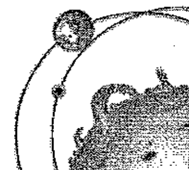


מה חושבים תלמידיך על גודל הירח בהשוואה לכדה"א? הרבה סיפורים נקשרו לירח, למופעיו, לקשר שבינו לבין אהבה, מחלות ומבצעים צבאיים. חלק מסיפורים אלה ידועים לתלמידיך, חלק אחר הם יצרו מניסיונם האישי. כילדים רבים מהם צפו בירח, ניסו להבין את המרחק אליו (ראה פעילות 7) ואת גודלו בהשוואה לכדה"א. לחלק מהם יש כבר עמדה ברורה בנושא, אחרים עדיין מתלבטים. בשלב זה הם מתבקשים לנסח השערה, כעין עמדת פתיחה שניתן יהיה לבחון אותה בהמשך הפעילות.

במחקרים שנעשו לגבי תלמידים בחטיבת-ביניים ובתיכון, ניסו החוקרים לברר את הערכת התלמידים לגבי גודל הירח בהשוואה לכדה"א. התלמידים התבקשו לצייר את גודל הירח בהשוואה לכדה"א. למרביתם הייתה נטייה לייחס חשיבות גדולה לכדה"א בהשוואה לירח. כתוצאה מכך נטו התלמידים לצייר את כדה"א כעיגול הגדול בקוטרו הרבה יותר מזה של הירח. יש בעמדתם התאמה אל הגישה היוונית, שראתה בירח גוף שמימי השייך לעולם השמימי. בעוד שעל פני כדה"א מתרחשים שינויים וקיימת פעילות אנושית ופעילות משתנית של הטבע, הרי שהשמים מכילים עצמים קבועים שאינם משנים את מסלולם ואת מבנם. זהו עולם הרמוני. בדומה למסורות נוספות הציג התנ"ך גישה הרואה בירח את "המאור הקטן לממשלת הלילה". הגדרת הירח כ"מאור קטן" מעוררת פרשנויות שונות, הן ביחס למילה "מאור" והן ביחס להגדרה "קטן". חלק מהתלמידים נוטים לפרש זאת "הירח הוא מקור אור המפיץ אור בכמות קטנה בהשוואה לכמות האור שמפיצה השמש". פירוש אחר מצביע על כך שהירח קטן בגודלו בהשוואה לגודל השמש.

כדי לברר מה חושבים תלמידיך ביחס לגודל הירח בהשוואה לכדה"א יש לצייר עיגול על הלוח בקוטר של כ-50 ס"מ, המייצג את הארץ, ולבקש מהתלמידים לצייר עיגול המייצג את הירח. הערכה היא שמרבית התלמידים סבורים שהירח קטן יותר בהשוואה לכדה"א, אך פי כמה קטן יותר? התשובות לשאלה זו שונות בהתאם להערכה ראשונית, שגיבשו התלמידים במהלך ההתבוננות שלהם בירח ובשיחות שקיימו עליו ועל השפעתו עליהם. בדרך-כלל הפרופורציות בין קוטר הארץ לקוטר הירח הן בין 1:2 לבין 1:10.

בדיון בכיתה שיתקיים לאחר הדיונים בקבוצות, יש לבקש מנציגי הקבוצות לצייר את עמדתם על הלוח כדי לקבל תמונת מצב של הדעות השונות בכיתה. נציג מכל קבוצה יתבקש להציג את הערכתו ולנסות לנמק אותה. לעתים, אין לתלמידים נימוק של ממש, אלא הערכה שפיתחו במהלך השנים. כדרכנו, אין צורך לסכם את הדיון בעמדת המורה, אלא להשאיר את העמדות השונות על הלוח ולפנות אל הפעילות הראשונה.



פעילות בבניית דגמים

מודל כמתווך בין ידע ישן לידע חדש

המודל שבחרנו לטפל בו הוא מודל הבנוי על כדורים המוכרים מחיי היומיום. מפתיע עד כמה אנו נעזרים בכדורים בחיי היומיום. ניתן להתחיל בכדורים זעירים של מילוי עט כדורי, המשך בכדורים הנמצאים במסבים (קוגלגרים), כדורי בלורות (גולים), כדורי פינג-פונג, כדורי מתכת וכדורי פלסטיק, כדורי הוקי, כדורי-רגל, בלונים בגדלים שונים, כדורי-סל וכדורים פורחים. היכולת לבנות מודל בעזרת חומרים מוכרים מאפשר לחבר את הדמיון אל מציאות מוכרת. לקראת פעילות זאת רצוי להצטייד באוסף כדורים מגוון. הגיוון בכדורים מאפשר בניית דגמים ביחסים שונים ולהמחיש את קנה-המידה הנשאר קבוע למרות השוני בגודלם של הכדורים שמהם נבנה המודל.

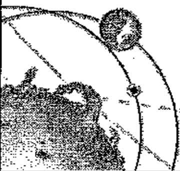
דגם ארץ-ירח

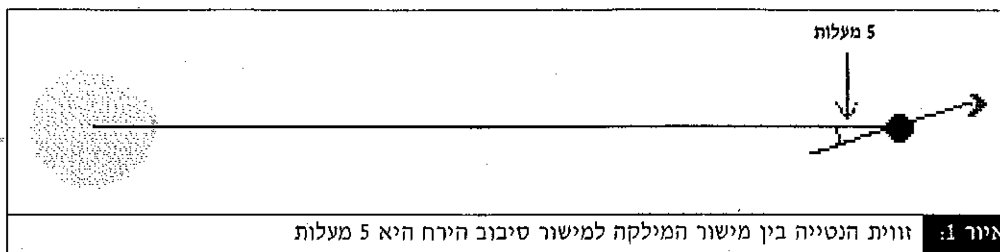
לצד הקביעה של הפרופורציות בין קוטר כדה״א לבין קוטר הירח, נכנס בבניית מודל זה גם המרחק בין שני הגופים. בדרך-כלל אין שמים לב לפרופורציות שבין הקטרים לבין המרחק המפריד בין הגופים. מרבית המודלים המסחריים מקפידים במקרה הטוב על פרופורציות בין הקטרים של הארץ והירח. לכן עבור התלמידים בניית מודל המייצג את המרחק לפי קנה-מידה נכון היא הפתעה רבה. המרחק בין הגופים גדול מאוד בהשוואה למה שמרבית התלמידים משערים.

בפעילות זו התבקשו התלמידים ליצור מודל סטטי. כלומר, עליהם לעמוד במרחק המתאים לקנה-המידה שחשבו. ניתן להוסיף לפעילות זו גם מודל דינמי. לצורך העניין אנו מניחים כי רוחב הכיתה הוא כחמישה מטרים. כלומר קוטר מסלול הירח סביב כדה״א יוצג על-ידי גודל זה. מכאן, שכל מטר מייצג כ-160,000 ק״מ. לכן קוטר הכדור המיצג את כדה״א צריך להיות כ-8 ס״מ וקוטר הכדור המיצג את הירח כ-2 ס״מ. ניתן להפעיל את המודל הדינמי בעזרת שני תלמידים, כאשר אחד ניצב במרכז הכיתה (שפונתה מהשולחנות והכיסאות), והשני סובב סביבו. לפעילות זו יש ערך נוסף, כאשר מקשרים אותה לפעילות ״מופעי הירח״. מעבר לפרופורציות של גודל ומרחק מתבהרת תופעה, שכבר דנו בה והפעם היא זוכה לייצוג על-ידי מודל בקנה-מידה מתאים.

מדוע אין בכל חודש ליקוי לבנה או ליקוי חמה?

כדי לקרב מודל זה למציאות יש צורך להוסיף את העובדה שמישור סיבוב הירח נוטה ביחס למישור סיבוב הארץ סביב השמש בזווית של 5 מעלות. במציאות פירוש הדבר שבכל סיבוב הירח מגיע עד 35,000 ק״מ מעל מישור הסיבוב של הארץ סביב השמש, ולאחר מכן יורד באותה מידה מתחת למישור הסיבוב. נניח כי מישור הסיבוב של הארץ סביב השמש במודל שלנו מקביל לרצפת הכיתה. כאשר מתחילים את תנועת הירח מהמישור האופקי של כדה״א, התלמיד הנע סביב ה״ארץ״ במודל צריך ברבע הסיבוב הראשון להעלות את ״הירח״ בהדרגה עד 22 ס״מ מעל המישור האופקי שבו נמצאת ה״ארץ״. ברבע השני עליו להוריד את ה״ירח״ בהדרגה עד המישור האופקי, ברבע השלישי להוסיף ולהורידו עוד 22 ס״מ מתחת לפני המישור האופקי, וברבע האחרון של הסיבוב להעלות אותו בהדרגה אל המישור האופקי.





איור 1: זווית הנטייה בין מישור המילקה למישור סיבוב הירח היא 5 מעלות

כדי שיתרחש ליקוי לבנה או ליקוי חמה, צריכים הארץ, הירח והשמש להיות בקירוב על ישר אחד. הזווית שבין שני מישורי הסיבוב מצביעה על העובדה, שלא בכל חודש מתקיים תנאי זה בשל הנטייה בין שני המישורים.

תשובות לשאלות (עמ' 117)

א. מטרת השאלה הראשונה להדגים את העובי הקטן של שכבת האטמוספרה בהשוואה לממדי הארץ. בשאלה זו ניתן לשוחח מעט על לוויינים על חלליות ועל התפקיד החשוב שהם ממלאים בטכנולוגיה של המאה ה-21. כדי שחללית או לוויין ינועו לאורך זמן עליהם להיות מחוץ לאטמוספרה הצפופה. כאשר הם יורדים לאזור שבו צפיפות האטמוספרה די גדולה כדי להפעיל כוחות חיכוך, יאטו הלוויין או החללית את מהירות תנועתם, קוטר מסלולם יקטן, והם ייכנסו למסלול ספירלי מתכנס, שבו מהירות הסיבוב הולכת וגדלה, והחום הנוצר כתוצאה מכוחות החיכוך מעלה את טמפרטורת פני החללית עד שהיא מתלקחת. נניח שגובה השיוט של החללית מייצג את עובי האטמוספרה הצפופה, וקוטר הארץ הוא כ-12,800 ק"מ, לכן היחס בין עובי האטמוספרה לקוטר הארץ הוא: 1:26.7. בהנחה שקוטר הגלובוס הוא 40 ס"מ, הרי שעובי האטמוספרה ייוצג על-ידי מרחק של 1.5 ס"מ.

ב. שאלה זו נועדה להדגים את המיקום היחסי של לווייני תקשורת. מרחקם של לווייני התקשורת ביחס לקוטר כדה"א הוא בקירוב 1:3. בדגם של גלובוס רגיל מדובר במרחק של כ-120 ס"מ, כאשר קוטר הגלובוס הוא 40 ס"מ. כאשר מדובר בדגם ארץ-ירח, שתואר בסעיף הקודם לפיו כדה"א מיוצג על-ידי כדור שקוטרו 8 ס"מ, יהיה מרחק הלוויין 24 ס"מ ממרכז הארץ.

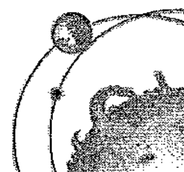
ג. סעיף זה עוסק בארבעה מרחקים: עובי האטמוספרה, קוטר הארץ, מרחק לווייני התקשורת, מרחק ארץ-ירח. אם ניקח את עובי האטמוספרה כיחידת מידה, הרי שהפרופורציות בין ארבעת המרחקים הן: 2500 : 80 : 26.7 : 1.

דגם ארץ-שמש

יחסי ארץ-שמש: קוטר כדה"א קטן פי 109 מקוטר השמש. אם כדה"א מיוצג על-ידי כדור טניס בקוטר של כ-10 ס"מ, את השמש ייצג כדור בקוטר של כ-11 מטר! (כבניין בן 3 קומות).

המרחק בין כדה"א לשמש הוא 149,500,000 ק"מ בממוצע. במרחק זה ניתן להכניס את השמש כ-107 פעמים.

1. מטרת סעיף זה להראות את יחסי הגודל העצומים בין גודלו של כדה"א, הנתפס בטרם פרק זה כגוף גדול מאוד, לגוף אחר - השמש, שגדול ממנו בהרבה. השמש נראית בשמים כגוף לא גדול במיוחד אבל רושם זה נוצר עקב המרחק הרב בין כדה"א לשמש. במרחק זה יעסוק הסעיף הבא.



2. מה המרחק בינינו לבין השמש? הלא היא נראית תלויה לה ברקיע כמו קישוט. האמנם? ואם היא כל-כך רחוקה, איך רואים אותה גדולה יחסית? בסעיף הקודם נדמתה השמש כבעלת גודל בלתי נתפס כמעט, אך אם סדר-הגודל בו עוסקים הוא המרחק בין כדה"א לשמש, הרי שהיא נראית קטנה. בבניית הסעיפים יש עליית מדרגות: בחלק הקודם עסקנו בסדרי-גודל של כדה"א: עובי האטמוספרה, גובה טיסת לוויינים ואפילו המרחק אל הירח. בחלק הזה עוברים להכיר את גודל השמש ואחר-כך עולים קנה-מידה נוסף אל המרחק בין כדה"א לשמש. בעסקנו ביקום אנחנו מסתכלים על תמונה מנקודות מבט שונות. תחילה, על פני כדה"א, אנחנו מסתכלים עליה מקרוב מאוד, רואים את רסיסי הצבע, החומרים, הטקסטורה וכו'. לאט-לאט נתרחק מהתמונה, אמנם נאבד פרטים, אך נתחיל לקבל מושג לגבי הרעיון המובע בתמונה כולה. כרגע אנחנו עוסקים רק בחלק קטן יחסית שלה - מערכת השמש, אבל מכאן הדרך פתוחה להכרת התמונה - היקום כולו. בסעיף א בשאלה נביא את המרחקים במערכת ארץ-שמש אל מערכת הגדלים המוכרת לתלמיד מחיי היומיום, כך שיוכל להכיל את קנה-המידה של המערכת.

דגם שמש-ארץ-ירח

בחלקים הקודמים התנסינו בסדרי-הגודל שבין הארץ לירח, ובנפרד, בקנה-המידה שבין השמש לכדה"א. כעת, נשלב את שני הדגמים לדגם אחד. לחלק זה תספיק שעה אחת.

המרחק "עד לירח" מבטא לרוב מרחק עצום, שאין דרך להכיל אותו. האמנם? האם הוא באמת כה גדול? בחלק זה נראה שהמרחק בין כדה"א לירח קטן מאוד בהשוואה למרחק בין השמש לכדה"א.

1. בשאלת חישוב זו נתון המרחק בין השמש לכדה"א, ועל-פי הנתונים יש לחשב את הגדלים הרלוונטיים בקנה-המידה המתאים. אם מרחק של 150,000,000 ק"מ מיוצג על-ידי מרחק של 10 מטרים, הרי שכל ס"מ מייצג מרחק של 150,000 ק"מ. קוטר השמש הוא 1,400,000 ק"מ, ולכן ייוצג על-ידי כדור שקוטרו מעט פחות מ-10 ס"מ: 9.3 ס"מ. קוטר כדה"א הוא 12,800 ק"מ כלומר קוטרו ייוצג על-ידי כדור בקוטר של פחות מעשירית הס"מ: 0.9 מ"מ.
2. בשאלה זו יישום קנה-המידה הוא לכיתה הפיזית שבה לומדים התלמידים. כלומר, איך תיראה המערכת אילו הכניסו אותה לסביבת המחיה שלהם. יש כאן מפגש מעניין בין האופן שבו תופס התלמיד את כדה"א כגוף עצום, לבין זעירותו המתקבלת בקנה-מידה יחסית למרחק בינו לבין השמש.
3. שאלה חישובית על מנת לקבל את הגדלים הרלוונטיים.
4. כנ"ל.
5. בשאלה זו מתבקש הלומד להביא את הגדלים שחושבו אל מערכת גדלים המוכרת לו מחיי יומיום: כדור טניס, פינג-פונג, ראש סיכה וכו'.



דיון מסכם

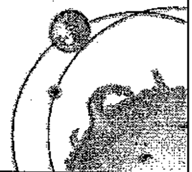
כאשר ילד מעוניין לומר על דבר-מה שהוא גדול מאוד, ניתן לא פעם לשמוע את הביטוי "גדול כמו כל העולם". ופתאום לאחר פעילות זו מסתבר שעולמנו זה זעיר הוא.

השמש (הנחשבת ככוכב ממוצע מאוד ביקום) גדולה ממנו עשרות מונים, עד שנדמה שקשה לתפוס את גודלה. גובהו של אדם ממוצע הוא כ-1.75 מטר, כך שהעולם שזוכה להתייחסותנו היומיומית הוא בגדלים המצויים בסדרי-הגודל שבין עשרות ס"מ למספר מטרים. אנו נוטים להתעלם מעצמים קטנים ולא להתייחס לפרטים בעצמים גדולים, כך שגודלו של כדה"א נראה לנו עצום ואין בעצם אפשרות להפנים את גודלו. כעת, מסתבר לתלמיד שכדה"א קטן מאוד יחסית לשמש. הסתירה קיימת, ויש להתייחס אליה כאל מצב של מעבר מקנה-מידה אחד למשנהו. אם ננסה לחשב גדלים אסטרונומיים לפי קנה-המידה המשמשים אותנו בחיי יומיום, נגיע למספרים עצומים, דבר שמסבך את החישובים. לשם כך בנו המדענים יחידות מדידה גדולות הרבה יותר:

יחידה אסטרונומית - היא המרחק בין כדה"א לשמש, כלומר כ-150,000,000 ק"מ.

שנת אור - 9×10^{13} ק"מ, זהו המרחק אותו עוברת קרן אור בשנה אחת.

פארסק - כ-3.1 שנות אור.



פעילות 17: בניית דגם של מערכת השמש

מבוא

פעילות זו נועדה להפגיש את התלמיד עם ממדי מערכת השמש, שהיא הסביבה הקרובה אלינו במושגים קוסמיים. היכרות זו משולה להיכרות אדם את רחובות השכונה שבה הוא חי. התחלנו בהיכרות מעמיקה יותר של הבית בו אנו חיים: כדה״א, דרך מיקומו יחסית לגוף הקרוב ביותר אלינו - הירח. המשכנו בהיכרות עם הגוף הבולט ביותר בסביבה השמש, אשר לה נוכל לייחס את ראשית הצירים עם יציאתנו למסע.

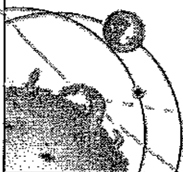
השמש הניצבת מרכז המערכת הקרויה על שמה, תהווה בסיס יציאה לבניית דגם מערכת השמש. בחוברת הפעילויות מצוין שזוהי פעילות לכל זוג תלמידים בעזרת גופים המוכרים לתלמידים מחיי היומיום. מטרתה העיקרית של הפעילות היא לתת ללומדים את התחושה לגבי סדרי-הגודל של הגופים והמרחקים במערכת השמש. משך זמן הפעילות הוא שיעור עד שני שיעורים, ומומלץ לבחור מועד של שני שיעורים צמודים.

מה דעתך?

הירח הוא הגוף השמימי היחיד שאליו הגיעו בני-אדם. כל שאר הגופים שנחקרו ונחקרים במערכת השמש, זכו לביקור של מכונות מעשה ידי האדם, אך בני-אדם לא הגיעו אליהם. אחת הבעיות העיקריות העומדות בפני מתכנני מסע כזה היא משך המסע. אל הירח טסו אסטרונאוטים במשך כשלושה ימים. משימות מעבורות החלל, כלי התחבורה המחבר את תחנות החלל עם בסיס האם הארץ, מוגבלות ל-16 יום בלבד. בתחנת החלל ״מיר״ שהו קוסמונאוטים, בדרך-כלל כחצי שנה. לעומת הישגים טכנולוגיים אלה יש לבחון, כמה זמן יארך מסע אל מאדים, צדק, אורנוס.

כתושבי כדה״א הרגילים למרחקים ולזמנים אנושיים, המסע אל מרחבי מערכת השמש הוא בבחינת כניסה אל מערכת מושגים חדשה. זהו מצב שבו צריך לשנות ולכוון מחדש מערכות מושגים רבות, שעד כה שירתו אותנו היטב. לכן חשוב לאפשר לתלמידים להציג את עמדותיהם ואת דרך לחשיבתם ביחס למערכת שאינה מוכרת להם, לפחות בהיבט הכמותי.

1. האסטרונאוטים שטסו לירח במשימות ״אפולו״, הגיעו אליו לאחר מסע בן שלושה ימים. נרצה טיסה אל מאדים באותה מהירות, בהנחה שמאדים נמצא בנקודה הקרובה ביותר אל כדה״א, תארך 609.4 ימים.
2. טיסה לאורנוס באותם תנאים (מהירות, מיקום הכי קרוב לכדה״א) תארך 7,083 ימים, שהם מעט יותר מ-19 שנה. אולם מאחר שמדובר בחללית משוכללת יותר, מסעה יארך ״רק״ תשע שנים.
3. מסעה של חללית המחקר ״וויאג׳ר-2״ לשולי מערכת השמש נמשך 14 שנה, משנת 1977 ועד שנת 1991.



הציוד הדרוש (עבור כל זוג תלמידים):

- אוסף כדורים בגדלים שונים.
- סרגל באורך 1 מטר.
- 10 שיפודי עץ.
- סרט הדבקה.
- פלסטלינה.

התלמידים יבנו את הדגם על-פי חישובי הגדלים הרלוונטיים בעזרת טבלה הנתונה בסוף הפעילות בחוברת. לפי ההצעה בחוברת יש צורך במרחב שאורכו כ- 60 מטרים. ייתכן שתתקשה למצוא מרחב כזה, אך ניתן לפתור את הבעיה **במספר דרכים**:

א. שינוי קנה-המידה, כך שכל ס"מ ייצג 2 מיליון ק"מ. בכך יקטן הצורך באולם או במרחב שאורכו 30 מטרים בלבד.

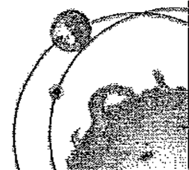
ב. ויתור על הפלנטה החיצונית ביותר במערכת השמש - פלוטו, ושמירה על קנה-המידה. בדרך זו מצטמצם המרחק הדרוש ל- 45 מטרים.

ג. ניסיון לבנות מערכת שמש גדולה לפי קנה-מידה אחר - נניח שמרכז השמש נמצא סמוך לכיתת הפיזיקה או חדר המנהל, והפלנטות מפוזרות לאורך בית-הספר. במקרה זה ניתן להחליט על קנה-מידה ההולם את ממדי בית-הספר. היתרון של דגם זה שהוא עשוי לשמש כיתות נוספות ולעורר סקרנות רבה.

בהמשך נתייחס אל ההצעה המופיעה בחוברת לתלמיד, אך כאמור בפעילות זו ניתן לשנות את המודל בהתאם לאילוצים וליצירתיות של המורה והכיתה. בשלב ראשון יצמידו לכל שיפוד כדור בגודל המתאים מאוסף הכדורים שהוכנו לפעילות זו. אם אין ברשותם כדור כזה, ייצרו כדור פלסטלינה בגודל המתאים. יש לזכור כי בקנה-המידה המוצע השמש היא בקוטר של 1.3 ס"מ, צדק יהיה 0.14 ס"מ השקול לראש סיכה, והארץ רק 0.012 ס"מ, כלומר בקושי חוד סיכה. ניתן להבין כי בקנה-מידה זה, השומר על יחס נכון של מרחק ורדיוס של גרמי השמים, מומחש עד כמה המרחבים של מערכת השמש גדולים בהשוואה לכל המשתתפים בה. מערכת השמש למעשה כמעט ריקה.

בשלב הבא יחשבו את מיקום הגופים במערכת השמש שהם בונים, ויתקעו את השיפודים במקום המתאים יחסית לשמש, שהיא נקודת המוצא. עקב הזעירות של הפלנטות ניתן להצמיד לשיפוד פתק שעליו ייכתב שם הפלנטות.

השאלות בעמוד 120 אמורות לתת ללומד את ההרגשה לגבי ממד הזמן במסע במערכת השמש. הילד ייצא מכדה"א ויחל ללכת אל תחנות שונות במערכת השמש. קנה-מידה לחישוב הזמנים במסעות במערכת השמש יהיה המסע לירח, שאותו עברו אסטרונאוטים במשך שלוש יממות. בהתאם למידע זה יוערכו זמני מסעות אחרים במערכת השמש.



תשובות לשאלות (עמוד 120 בחוברת):

1. משנת 1969 ובמשך שנות השבעים המוקדמות בוצעו מספר מסעות מאוישים אל הגוף השמימי הקרוב אלינו ביותר - הירח. מסעות אלו ארכו כשלוש יממות. שאלה ראשונה אמורה לתת לתלמיד את "הכיול" לגבי מרחק במערכת השמש, שאורך המסע בו ידוע. מסע זה הוא הקצר ביותר במערכת השמש, ואליו יתייחס התלמיד כאל מידה בסיסית.

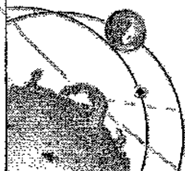
2. שדה המחקר העכשווי של נאס"א - סוכנות החלל האמריקנית - הוא הפלנטה מאדים. בניגוד לנוגה - הפלנטה השכנה השנייה שלנו - שהתנאים על פניה קטלניים, מאדים נראה ידידותי יותר, ויש להניח שהמסע המאויש לגוף הבא במערכת השמש יהיה לפלנטה זו. בשאלה זו יוכל הלומד לקבל את פרק-הזמן (בקנה-מידה, כמובן) לגבי מסע מעין זה. נתון בשאלה אומר שמסע החללית "וויאג'ר" למאדים נמשך כשנה, בעוד שבמודל שלנו זהו מרחק של שמונה ס"מ בקרוב. כלומר אם נניח שקצב הצעידה הוא כמטר בשנייה, הרי מסע בן עשירית השנייה על פני המודל שקול למסע בן שנה בחלל.

3. בהמשך נבדוק את פרק-הזמן הדרוש למסע אל צדק - הפלנטה הגדולה ביותר במערכת השמש, שנחקרה בעשור האחרון על ידי חללית מחקר בשם "גלילאו". החללית הנחיתה על פני צדק גששית מחקר. יש לציין שהמונח "על פני צדק" הוא מושג ערטילאי, כאשר נזכרים בעובדה שלצדק אין פני שטח מוצקים. המרכיב המוצק בפלנטה זו נמצא עמוק מאד מתחת למעטה הגז המרכיב את רוב רובה של הפלנטה.

4. בשאלה זו כבר נדרש הלומד ליישם את הניסיון, שהיה לו בשלושת המסעות הקודמים, ולחשב כמה זמן ארך מסע אל הפלנטה שבתאי. המרחק במודל שלנו בין שבתאי לכדה"א הוא כ-1.3 מטרים. פרק-זמן הנדרש לעבור מרחק זה בצעידה איטית הוא כ-1.3 שניות. בקצב הצעידה שלנו מסע זה עלול להמשך כ-13 שנים. למעשה, במרחבי החלל זמן התעופה מתקצר בשל מספר סיבות. המסע לירח אינו קנה-מידה מתאים, שכן זמני ההאצה וזמני ההאטה גדולים יחסית לזמן השיוט, בעוד שבמסע בין פלנטות אין כמעט משמעות לזמנים אלה. לכן בפועל "וויאג'ר-2" הגיעה לצדק לאחר ארבע שנות מסע, "וויאג'ר-1" גמאה את המסע בשלוש שנים בלבד. יש לציין שבמקרה זה היא נעזרה רבות בהאצה גרוויטציונית של פלנטת צדק.

5. הפלנטה פלוטו לא נחקרה עד כה מקרוב על-ידי אף רכב חלל. כאן מזדמן לתלמיד לבצע את החישוב המקורב לפרק-הזמן לגבי מסע שטרם בוצע. אם נשנה את קנה-המידה, כך שכל שנית צעדה תהיה שקולה לפרק-זמן של שנה במסע בין-פלנטרי, כלומר פי עשרה מהר יותר מאשר הקצב במסע לירח, נקבל תוצאות סבירות יותר. יש לזכור שמסלולה של פלנטת פלוטו אינו מעגלי, אלא אליפטי. בעשור האחרון של המאה העשרים היא הייתה קרובה לשמש מאשר נפטון. אך אם ניצמד לנתונים שבטבלה, הרי שהמרחק מהארץ לפלוטו הוא כ-59 מטרים. בקצב צעידה של מטר בשנייה יימשך המסע 59 שנים. למעשה, "וויאג'ר-2" חלפה סמוך למסלול פלוטו לאחר 14 שנות שיוט בחלל. הסיבה למהירות הגבוהה של "וויאג'ר" הייתה ניצול של האצה גרוויטציונית, שבוצע גם על-ידי שבתאי וגם על-ידי אורנוס ונפטון. בתנאים אלה יש לכייל מחדש את המהירות ולהעמיד כל שנת מסע על ארבע שניות צעדה.

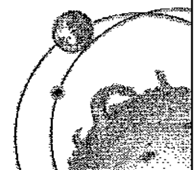
6. כאן אנחנו כבר יוצאים ממערכת השמש וזורקים ללומד מתאבן בדמות המסע אל הכוכב הקרוב ביותר אל מערכת השמש, הוא אלפא סנטאורי. חישוב זה ישפוך אור דקיק על המרחקים העצומים ביקום שמעבר למערכת השמש שלנו. אם ניעזר בכיול האחרון שביצענו בשאלה הקודמת, ימשך מסע זה לפחות 7,000 פעמים 14 שנה, כלומר 98,000 שנה. כלומר חללית מסוג זה צריכה להיות מסוגלת לאפשר למאה דורות של טייסי חלל להשלים את חייהם בתוכה. בהקשר זה ראוי להזכיר את ספרם של פרופי חגי נצר ואורי בן-בסט, "מסע אל התבונה חיפוש אחר חיים ביקום".



רעיון נוסף:

את הפעילות הזו אפשר לבצע במספר דרכים. ההקפדה על קנה-מידה אחיד תיקבע בהתאם לרמת הקבוצה הלומדת. מידת ההקפדה על הפרטים תקבע את משך זמן הפעילות, ואפשר לבחור את הפעילות גם כפרויקט ארוך-טווח:

- בדרך הראשונה המורה בוחר את מידת הפירוט של הדגם לפי רמת התלמידים. כל ילד יבנה דגם של מערכת השמש, כאשר קנה-המידה אינו אחיד. בדרך זו יאסוף הלומד פרטים על הפלנטות השונות, סדר מרחקן מהשמש וכו'. בניית דגם זה מתאימה בעיקר לילדים צעירים יותר או תלמידים שאינם בעלי נטייה מתמטית לחישובי המידות בקנה-מידה. לקבוצות ילדים מתקדמים או מתעניינים מאוד אפשר לשלב גם את חישובי קנה-המידה של גדלי הגופים והמרחקים השונים במערכת השמש, ואז מדובר בפרויקט של ממש שיצריך זמן רב. אפשר לשלב את הבנייה עם תחרות לדגם המדויק ביותר על-פי קריטריונים, שייקבעו על ידי התלמידים עצמם. מניסיוני כמדריך בחוגי נוער שוחר מדע, דרך זו מאוד אטרקטיבית ומעניינת.
- דרך נוספת היא חלוקת הכיתה לקבוצות תלמידים בנות כ-10 תלמידים בקבוצה. כל תלמיד יהיה אחראי לגוף מסוים במערכת השמש ואז לקבוצה כולה יהיה דגם אחד של המערכת. כאן יש להקפיד על חישובי קנה-מידה שעליו יחליטו כל חברי הקבוצה כדי לקבל אחידות: למשל, אורך הכיתה או המסדרון יהיה סדר-הגודל של מערכת השמש. כל תלמיד מחשב את הגודל היחסי של הגוף שאותו הוא אחראי לדגום, והקבוצה כולה משתתפת בחישובי המרחקים היחסיים המתאימים להצבת הגופים על-פי קנה-המידה הנבחר. מהפעילות הקודמת ניתן לראות שיהיו פרטים שיהיו קטנים מדיי להצגה, ואז אפשר רק לייצג את מיקומם על-ידי שיפודים העומדים במקום הרלוונטי, ועליהם פתקים עם שמות הגופים.
- הדרך השלישית מתאימה כפעילות חוץ-כיתתית, כאשר כל הכיתה משתתפת בהכנת הדגם. אפשר לבחור מקום רחב-ידיים כמו מגרש הספורט בבית-הספר ולחשב את הגדלים המתאימים לסדר-הגודל של הגופים.



סגל מערכת השמש

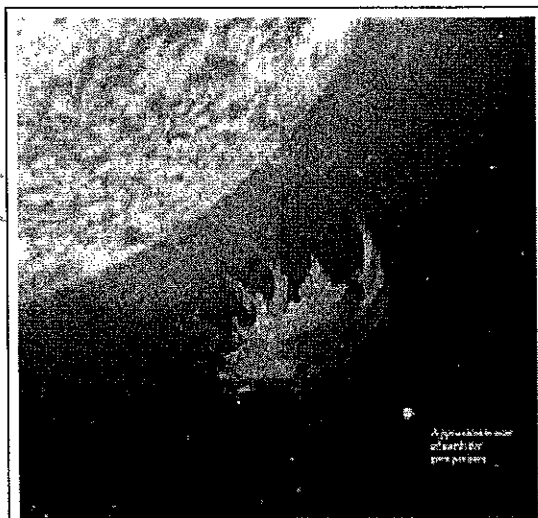
בחלק זה של המדריך למורה נסקרת מערכת השמש על שתקניה העיקריים. אנו פותחים בהצגת מערכת היחסים ארץ-שמש וארץ-ירח. לאחר מכן הדיון עובר להצגה של כל אחת מהפלנטות. בסיום מוצגים האסטרואידים והשביטים. סקירה זו היא כמעט ברמה של כרטיס ביקור של כל אחד מגרמי השמים. המורה המעוניין מוזמן להרחיב את ידיעותיו בספרות הנמצאת בסיום החוברת או באתרי אינטרנט רבים מאוד העוסקים בכך.

מערכת ארץ-שמש

קוטר השמש הוא 1.4 מיליון ק״מ בקירוב, וקוטר כדה״א 12,600 ק״מ בקירוב. מה משמעות מספרים אלה? כדה״א קטן פי יותר מ-100 מהשמש!
אולי כדאי לראות את התמונה שבאיור 2:

התמונה מראה התפרצות שמש, שבמהלכה נזרקה לחלל מסה מאטמוספרת השמש.
הנקודה הכחולה מימין למטה אינה לכלוך על העדשה, זהו כדה״א.

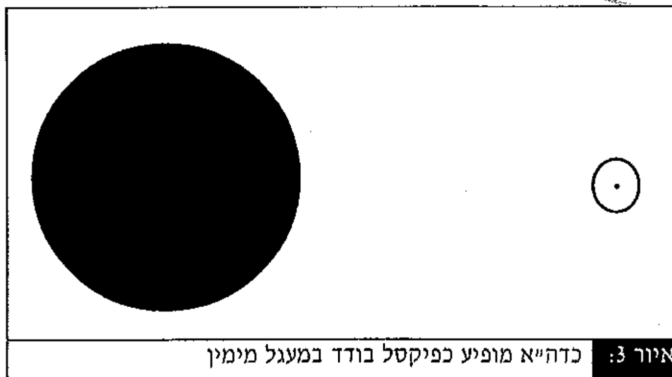
התמונה צולמה במארס 1999, כדה״א הושם שם בקוטרו האמיתי לשם השוואה.



איור 2: כדור-הארץ יחסית לשמש

איור 3 ממחיש את **יחסי הגודל** שבין השמש לכדה״א, שנמצא כנקודה בודדת (פיקסל יחיד) בתוך המעגל האדום ששורטט לנוחיות מציאת כדה״א בלבד.

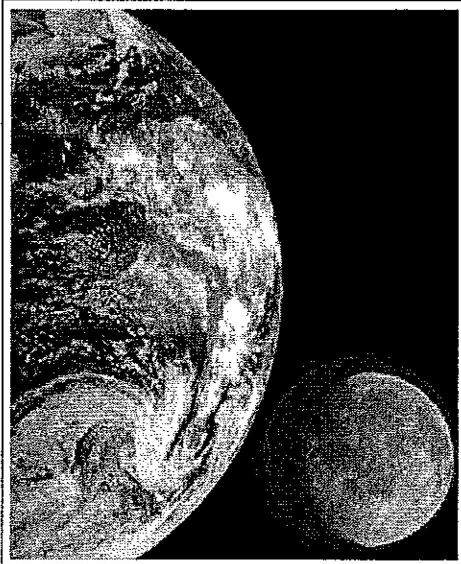
המרחק בין כדה״א לשמש איננו מדויק כלל בשרטוט זה. צר לנו אך הספר קטן מדיי.
אם היינו רוצים לשרטט את המערכת שמש - כדה״א בקנה-מידה אמיתי, היה כדה״א היה מופיע במרחק 317 ס״מ מהשמש לפי הגדלים האלו.



איור 3: כדה״א מופיע כפיקסל בודד במעגל מימין



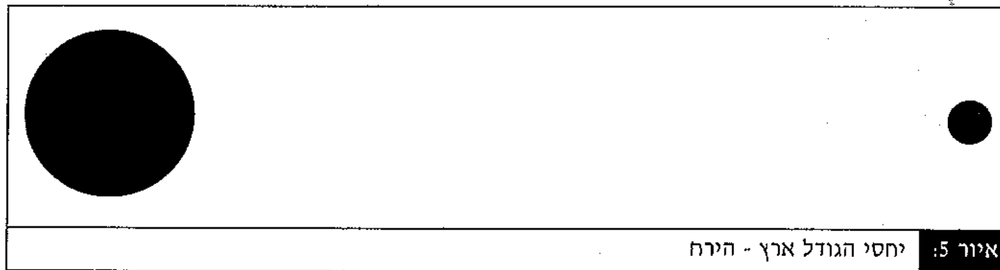
מערכת ארץ-ירח



איור 4: כדור-הארץ והירח

הירח, הלוויין הטבעי של כדה"א, מרוחק 384,000 ק"מ ממנו, והוא העצם השמימי הקרוב ביותר אליו. קוטר הירח קטן פי ארבעה מקוטרו של כדה"א. מסת הירח קטנה רק פי 81 ממסת כדה"א, וזהו יחס נמוך יחסית, מה שגורם לכך שהירח לא לחלוטין מסתובב סביב כדה"א, אלא שניהם נעים באופן מורגש סביב נקודת מרכז המסה שלהם, המצויה בערך שליש רדיוס כדה"א מפני כדה"א.
יחסי הגודל בין הירח לכדה"א הם מהגדולים במערכת השמש, רק לפלוטו וכרון יש יחס גדול יותר.

יחסי גודל ארץ-ירח

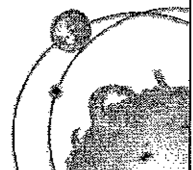


איור 5: יחסי הגודל ארץ - הירח

שרטוט סכמתי זה מדגים את **יחסי הגודל** בין כדה"א ובין הירח קוטר הירח קטן פי ארבעה בקירוב מקוטר כדה"א. המרחק אינו מצויר בקנה-מידה מתאים. כדי שגם המרחק ביניהם בשרטוט זה יהיה בקנה-מידה מתאים לגודלם, היה המרחק ביניהם צריך להיות 75 ס"מ.

השמש

השמש היא הכוכב היחידי במערכת השמש. אין לה קרקע מוצקה, והיא למעשה כדור גז לוהט: הטמפרטורה על פניה מגיעה לכ-5,700 מעלות קלווין, ובמרכזה הטמפרטורה מטפסת עד כ-15 מיליון מעלות קלווין.קוטר השמש כ-1,400,000 ק"מ, ומסתה 1.989 e+30 ק"ג, המדובר בפי-332,830 ממסת כדה"א.



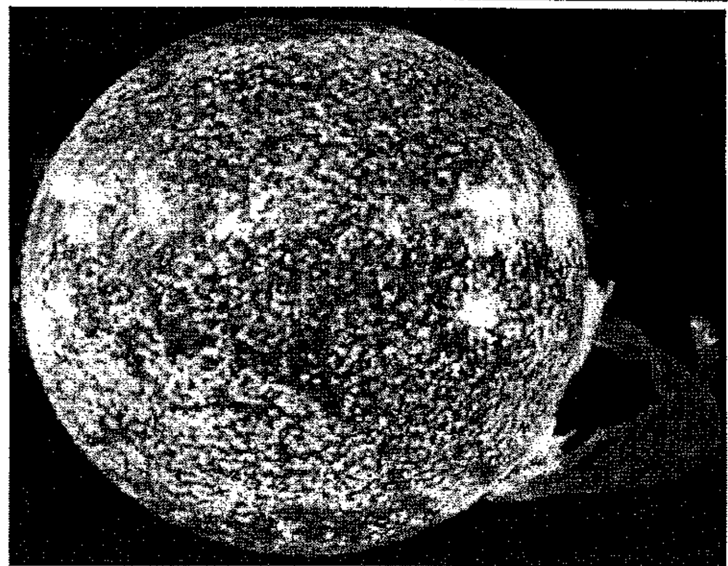


איור 6: קורונת השמש בשעת ליקוי חמה

עקב הטמפרטורה הגבוהה בשמש החומר בה נמצא במצב של פלסמה - מצב שבו האלקטרונים כבר אינם קשורים לגרעיני האטומים, והם מצויים בתערובת.

הרכב השמש הוא 92.1% מימן, 7.8% הליום והשאר יסודות כבדים יותר.

השמש סובבת סביב צירה אחת ל-27 יום בממוצע. אזור קו-המשווה מסתובב מהר יותר (פעם בכ-25 ימים) ובקטבים לאט יותר (פעם ב-36 ימים). הפרשי מהירות הסיבוב האלו גורמים לקווי השדה המגנטי של השמש "להסתבך" אלו באלו וליצור התפרצויות שמש המלוות לעתים בזריקת חלקיקים טעונים, הקרויים "רוח השמש", מהשמש אל החלל. חלקיקים אלו נעים במהירות של 350 ק"מ לשנייה. השמש מייצרת את האנרגיה בקצב של 3.827×10^{33} ארג לשנייה במרכזה. אזור זה קרוי ליבת השמש. הטמפרטורה שם מגיעה כאמור לכ-15 מיליון מעלות קלווין והלחץ הוא 340 מיליארד אטמוספרות. בתנאים אלו השמש הפרוטונים (גרעיני המימן) בליבה מתגברים על הדחיה האלקטרוסטטית ביניהם ויוצרים היתוך גרעיני, שבו ארבעה גרעיני מימן יוצרים גרעין הליום ושני נויטרונים תוך שחרור אנרגיה עצומה. תוכל לקרוא עוד על כך בהרחבה הפיזיקלית לפרק על מקור האנרגיה של השמש.

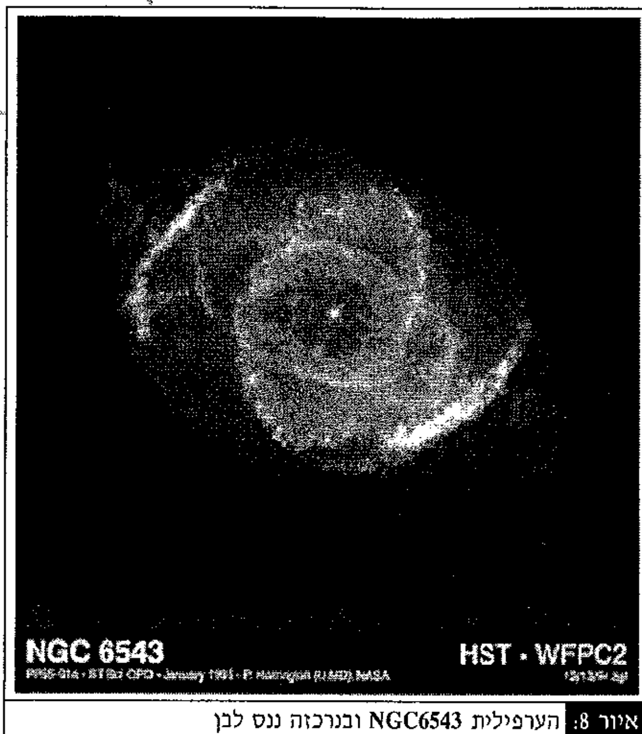


איור 7: התפרצות שמש, כפי שצולמה על-ידי החללית "סקיילאב", מדגימה את עוצמתה המדהימה של השמש

האנרגיה המשתחררת עושה את דרכה החוצה מהשמש במסע ארוך הנמשך מאות אלפי ואף מיליוני שנים. בתחילה האנרגיה משתחררת כקרינה דרך אזור הקרוי אזור הקרינה. שם החומר מצוי במצב פלסמה, והפוטונים מתנגשים באלקטרונים החופשיים ומשנים את מסלולם ללא הרף. מעבר לשכבת הקרינה מצויה שכבת ההסעה, שם הטמפרטורה כבר נמוכה יותר. הקרינה הופכת לתהליך יעיל פחות, ותהליך הוצאת האנרגיה היעיל יותר הוא על-ידי הסעה כמו גלי חום העולים מהקרקע ביום חם או החום העולה מתחתית סיר שמן חם. אז מגיעים הפוטונים לפוטוספרה ומשם מוקרנים לחלל. הפוטוספרה (כדור אור) היא העיגול שאותו אנו רואים, כאשר מביטים אל השמש. מעבר לו קיימת שכבת הכרומוספרה



הנראית בשעת ליקוי חמה ולה צבע כתום-ורוד, כתמי שמש בהירים והתפרצויות המופיעות בשכבה זו. ההתפרצויות הן להבות עצומות הפורצות מאזורי כתמי שמש, שהם אזורים של סערות מגנטיות על פני השמש הנראים כהים יותר מאחר והטמפרטורה שלהם נמוכה יותר (כ-4,000 מעלות קלווין).מעבר לכרומוספרה מצויה הקורונה של השמש. זוהי שכבת עננות זוהרת המקיפה את השמש ונראית יפה בשעת ליקוי חמה מלא. הטמפרטורה של הקורונה מגיעה למספר מיליוני מעלות, אבל חללית שתיכנס לשם לא תימס, מאחר שצפיפות האנרגיה באזור נמוכה ביותר.ממאובנים שנמצאו על כדה"א מסיקים שגילו כ-4.5 מיליארד שנה, ולפי ההנחה שהשמש והפלנטות נוצרו יחד, מסיקים שגם גיל השמש הוא כ-4.5 מיליארד שנה. חישובי האנרגיות, לשמש יש עוד כ-4.5 מיליארד שנה בטרם תכלה את הדלק המזין אותה, והיא תסיים את חייה כננס לבן (ראה איור 8).



איור 8: הערפילית NGC6543 ובנרכזה ננס לבן

מרקורי חמה

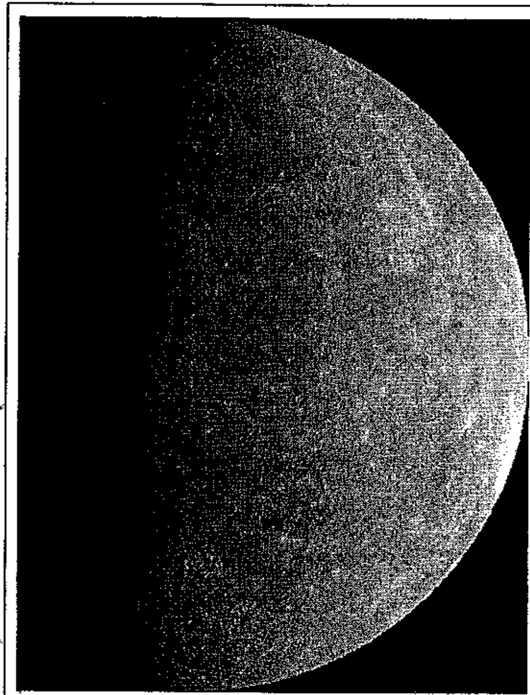
הפלנטה הקרובה ביותר אל השמש היא חמה או בשמה הלועזי - מרקורי. הרומאים קראו אותה על שם השליחים המכונפים של האלים, מאחר שהיא נראתה להם כפלנטה המהירה ביותר. מרחקה מהשמש 57,910,000 ק"מ בלבד. חמה היא פלנטה קטנה: מסתה $3.303\ 10^{23}$ ק"ג ורדיוסה הוא 2,439 ק"מ. כוח המשיכה שלה הוא חלש 2.78 מטר לשנייה בריבוע. בתנאים אלו ועקב קרבתה אל השמש (שגרמה לטמפרטורות גבוהות) לא נשארה לה אטמוספרה יציבה, והיא נמלטה ממנה.

אורך היממה על פני חמה הוא 58.65 ימים ארציים, והקפה שלמה מתבצעת תוך 87.97 יממות בלבד. במצב זה, שנה נמשכת יממה וחצי של חמה, כך שלכל צד יש זמן די והותר להיצלות בחום השמש.
בהעדר אטמוספרה מתקבלים תנאי טמפרטורות קיצוניים למדיי: הטמפרטורה הממוצעת היא 179 מעלות צלסיוס, כאשר הטמפרטורה המקסימלית - 427 מעלות והמינימלית -173 מעלות.

הנוף על חמה דומה למדיי לנוף שעל פני הירח - הרים עטויי אבק שגובהם מגיע למספר קילומטרים והנמשכים לרכסים באורך של מאות קילומטרים. פני השטח משובצים מכתשים שנגרמו על ידי מטאוריטים. כאמור, לחמה אין

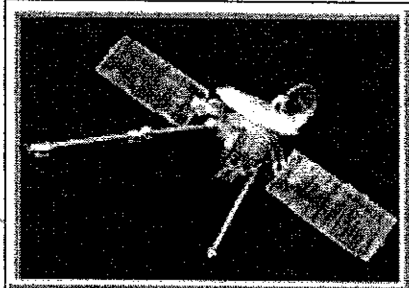


למעשה אטמוספרה (הקיימת דלילה ביותר ומורכבת מ-42% הליום, 42% סודיום, 15% חמצן ושאר המרכיבים אחוז אחד). לכן אם נביט בשמים, נראה את שמי חמה שחורים בהעדר גורמי פיזור.
מבט מדוקדק יותר יגלה שתי נקודות זוהרות - אחת בצבע קרם והיא נוגה, והשנייה כחלחלה - כדה״א.
חקר חמה נתקל בקשיים עקב העובדה שההפרדה המקסימלית הנראית בין חמה ובין השמש היא 28 מעלות קשת, כך שצפייה בה אפשרית רק מיד לאחר השקיעה או מיד לפני הזריחה, וגם אז על האור לעבור שכבת אוויר עבה פי עשרה יותר מאשר לו היה ישר מעל הראש.
חקר הפלנטה קיבל תאוצה גדולה עם שיגור החללית ״מרינר 10״: בשנות השמונים של המאה ה-19 שרטט ג׳ובאני סציפארלי סקיצה של חמה וקבע שהפלנטה חייבת להפנות אותו צד אל השמש כל הזמן בדיוק כמו שהירח מפנה כל הזמן אותו הצד אל כדה״א.
ב-1962 קבעו חוקרים בעזרת תצפיות רדיו שהטמפרטורה של ה״צד האפל״ גבוהה מכדי להיות

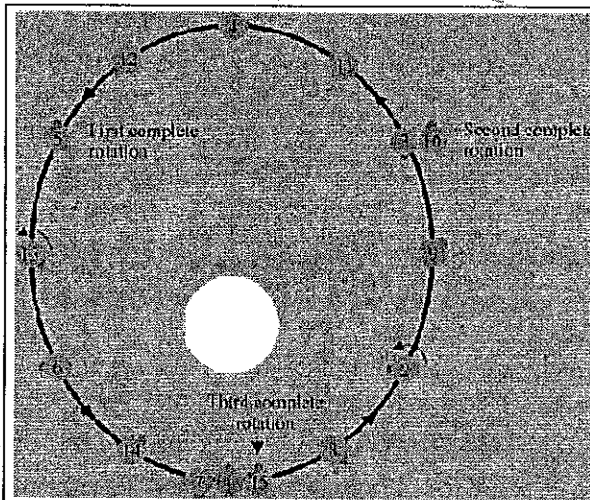


איור 9: פניה המצולקים של חמה

כזו שכל הזמן פונה מהשמש והלאה ובשנת 1965 גילו פטנגיל ודייס הבדל בין זמן המחזור סביב הציר לבין זמן המחזור האורביטלי (סביב השמש). מאז הסתבר שחמה מבצעת סיבוב וחצי סביב צירה במהלך שנה אחת שלה, כפי שמתואר באיור 11.



איור 10: החללית ״מרינר 10״



איור 11: שרטוט המראה את היממה לעומת שנה של מרקורי



נוגה - ונוס

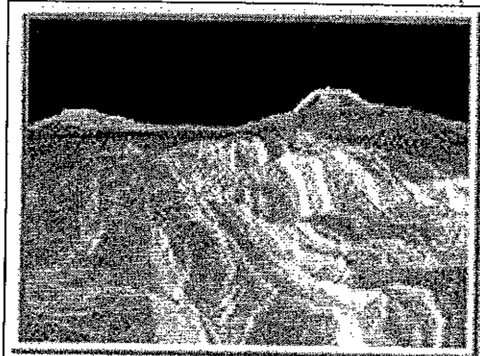

איור 12: העננים הסמיכים העוטפים את נוגה

במשך שנים רבות נחשבה הפלנטה ונוס לאחות תאומה לכדור-הארץ. לשתיהן גודל דומה (רדיוס נוגה הוא 6,051.8 ק"מ - 0.95 מזה של כדור-הארץ), מסה דומה (מסת הנוגה היא 0.81 מזו של כדה"א) וכן צפיפות ונפח דומים. הרומאים קראו לנוגה ונוס על שם אלת היופי והאהבה. אחרים כינו אותה "התכשיט שבשמים", אולם מסתבר שהשם רחוק מאוד מהמציאות.

מחקרים הראו שהתנאים על נוגה קשים מאוד: לנוגה אין אוקיאנוסים, האטמוספרה צפופה וסמיכה. היא אינה מכילה אדי מים ומורכבת מדו-תחמוצת הפחמן (96%) וחנקן (3%) ואחוז בודד של מרכיבים נוספים. העננים מורכבים מרסיסי חומצה גופרתית. על פני הקרקע הלחץ האטמוספרי הוא פי 92 מזה שעל פני כדה"א.

טמפרטורת פני הקרקע על נוגה היא 482° C הנגרמת בעיקר מאפקט החממה, שמקורו באטמוספרה הצפופה עשירת דו-תחמוצת הפחמן. הטמפרטורה על נוגה גבוהה מזו הקיימת על חמה הקרובה יותר לשמש - מרחקה הממוצע של נוגה מהשמש הוא 108,200,000 ק"מ (**הערה:** זהו פתח לדיון בנושא אפקט החממה וסכנותיו על פני כדה"א).

השנה על נוגה נמשכת 225 ימים, והיממה ארוכה יותר מהשנה: נוגה סובבת סביב צירה אחת ל-243 ימי ארץ, כתוצאה מכך השמש תזרח במערב ותשקע במזרח (הערה: אפשר לשלב מידע זה עם פעילות מסלול השמש ברקיע).


איור 13: פני הקרקע על נוגה

העננות הסמיכה על נוגה מנעה במשך תקופה ארוכה חקירת פני הפלנטה. האמריקנים עם חללית "פיוניר-ונוס" (1978), הרוסים עם חלליות "ונרה 15" ו-16 (1983-1984) ומיפוי פני נוגה על-ידי רדאר שביצעו האמריקנים בשנים 1990-1994 עם חללית המחקר "מגלאן" הראו לתושבי כדה"א את פניה האמיתיים של נוגה: פני נוגה היו נתונים לפעילויות גאולוגיות עד לא מזמן, כלומר עד לפני כ-400 מיליון שנה. יש על נוגה מישורי לבה ענקיים, הרים ורמות שעוצבו גאולוגית. אזורים הגבוהים מ-2.5 ק"מ נראים בהירים באופן חריג, כאילו הם לחים, אבל מאחר שלא נמצאו עדויות להימצאות מים משערים שהבהירות נובעת מהימצאות סוג של מתכת (אולי "זהב השוטים", או מתכת אקזוטית אחרת), הנשארת יציבה בגבהים אך לא במישורים הנמוכים.

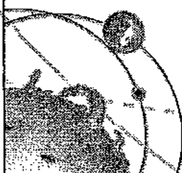
על פני נוגה מצויים מכתשים שנוצרו מגופים שפגעו בפלנטה. מכתשים הקטנים מ-2 ק"מ כמעט אינם בנמצא עקב הלחץ האטמוספירי העצום. נמצאו גם צבירי מכתשים שנוצרו על ידי מטאוריטים, שהתפוררו עקב החיכוך ממש לפני הפגיעה בקרקע. כ-85% מפני נוגה מכוסים באבנים וולקניות.
זרמי לבה אדירים זרמו במישורים העצומים, לאחר שהתפרצו מכ-100,000 הרי -געש קטנים ומאות הרי-געש גדולים. קיימים על נוגה לועות הרי געש בעלי קוטר של יותר מ-100 ק"מ לעומת לועות של קילומטרים בודדים על פני הארץ.

כדור-הארץ


איור 14: זוהר הקוטב כפי שצולם ממעבורת החלל

פלנטת הבית שלנו נראית גדולה ומסיבית בעמדנו עליה, עם שכבת אוויר עצומה מעלינו.
מראה זה סותר את המראה הנגלה לצופה בה מבחוץ: שכבת האטמוספרה דקה ושברירית מאוד. כדה״א עצמו הוא מעין כדור שמנת המצופה בקרום של לוחות טקטוניים הצפים עליה.
הצבע הכחול האופייני נגרם עקב שבירת האור באטמוספרה (ראה פרק ״צבע השמים״), ולא כפי שמקובל לחשוב על ידי הימים והאוקיאנוסים. המים בולעים כ-95% מהאור הפוגע בהם, כך שלו הבטנו אל כדה״א ללא כסות האטמוספרה, היו הימים נראים שחורים.
מרחק כדה״א מהשמש כ-149,500,000 ק״מ בממוצע. הוא טס במהירות של 108,000 קמ״ש במסלולו סביב השמש ומשלים הקפה מלאה בתוך 365.256 יממות וסיבוב שלם סביב צירו תוך 23.9345 שעות. קוטרו 12,756 ק״מ, והאטמוספרה שלו מורכבת מ-78% חנקן, 21% חמצן ועוד אחוז בודד של מרכיבים שונים.
כדה״א הוא הפלנטה היחידה המאכלסת חיים, כפי הידוע לנו כיום. האטמוספרה הידידותית, המגינה מפני קרינה ונפילת גופים, והשדה המגנטי החזק הנגרם מסיבוב מהיר סביב הציר וגרעין של ברזל-ניקל נוזלי, המגן מפני שטפי חלקיקים מיוננים מגינים על התרכובות האורגניות, שבסופו של דבר יצרו את צורות החיים המאכלסות אותו כיום.
המחקר על היקום גילה לנו דברים רבים על כדור-הארץ: הלוויין האמריקני הראשון ״אקספלורר 1״ גילה את חגורות ואן-אלן, אזור בצורת סופגנייה המקיפות את קו-המשווה, של חגורות קרינה חזקה, שנוצרה מחלקיקים טעונים שנלכדו על-ידי השדה המגנטי של כדה״א. מחקרים נוספים מראים עיוות של השדה המגנטי של כדה״א לצורת טיפה הנגרם מרוח השמש. האטמוספרה של כדה״א מתרחבת ביום ומתכווצת בלילה, מושפעת מפעילות השמש ומשפיעה על מזג-האוויר על פני הפלנטה.

רוח השמש המגיעה אל כדה״א ונלכדת בשדה המגנטי שלו, גורמת לתופעת טבע מהממת ויזואלית הקרויה זוהר הקוטב. בתופעה זו החלקיקים הטעונים של רוח המגנטי של כדה״א ״נשפכים״ אל האטמוספרה דרך הקטבים הצפוני והדרומי, מתחככים בחלקיקי האטמוספרה ומהחיכוך נוצר הזוהר.



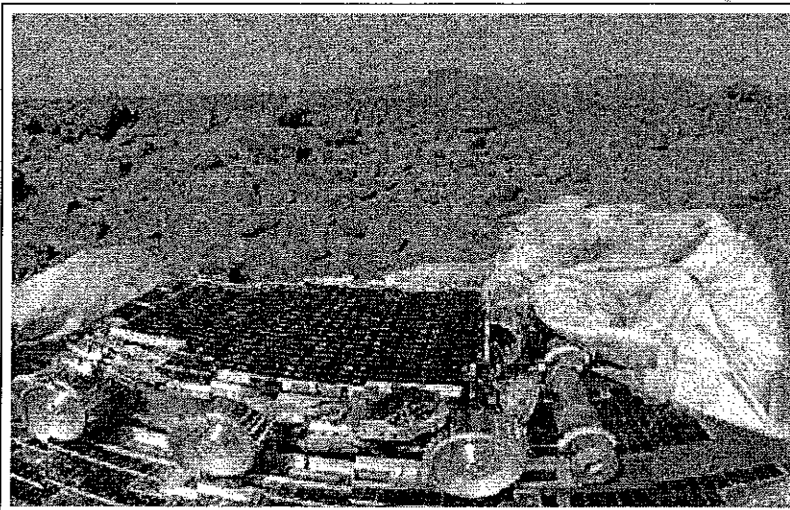
מאדים - מארס

מאדים, הפלנטה הרביעית במרחקה מהשמש, נראית לצופה בה, כפי שמעיד שמה, בצבע אדמדם הנגרם מהסלעים, האדמה והשמים בעלי הגוון הכתום-אדום-ורוד הכל-כך אופייני לה. הרומאים העניקו לה את שמו של אל המלחמה שלהם. הדבר היה אופייני בתרבויות שונות של העולם העתיק. המצרים הקדמונים קראו לה "האדום". בימים שקדמו למחקר המדעי המודרני, נחשב מאדים כפלנטה אידאלית לארח חיים חוץ-ארציים. המגמה התחזקה על-ידי גילוי "תעלות" על פניה שנחשבו מעשי ידי אותם יצורים.

מחזה שכתב ג'י הייצ' ויילס - "מלחמת העולמות" - שעובד לתסכית רדיו מדהים בסוף שנות השלושים על ידי אורסון ויילס, גרם לאמונה זו לפרוץ את כל גבולות ההגיון.

תמיכה נוספת לדעה ניתנה על-ידי תצפיות, שהראו שינויי גוונים על פני הפלנטה כתלות בעונות השנה, דבר שנדמה כתקופת פריחה של צמחים שונים.

ביולי 1965 צילמה חללית המחקר "מרינר 4" את פני המאדים ממסלול סביבה כל שהתגלה היה מכתשים וערוצים מקריים בקרקע. ב-1976 חלליות המחקר "ויקינג 1" ו-2 נחתו וערכו ניסויים באמצעות מכשור שהיה על החלליות, אבל לא התגלתה שום עדות לחיים בסביבת אתר הנחיתה.



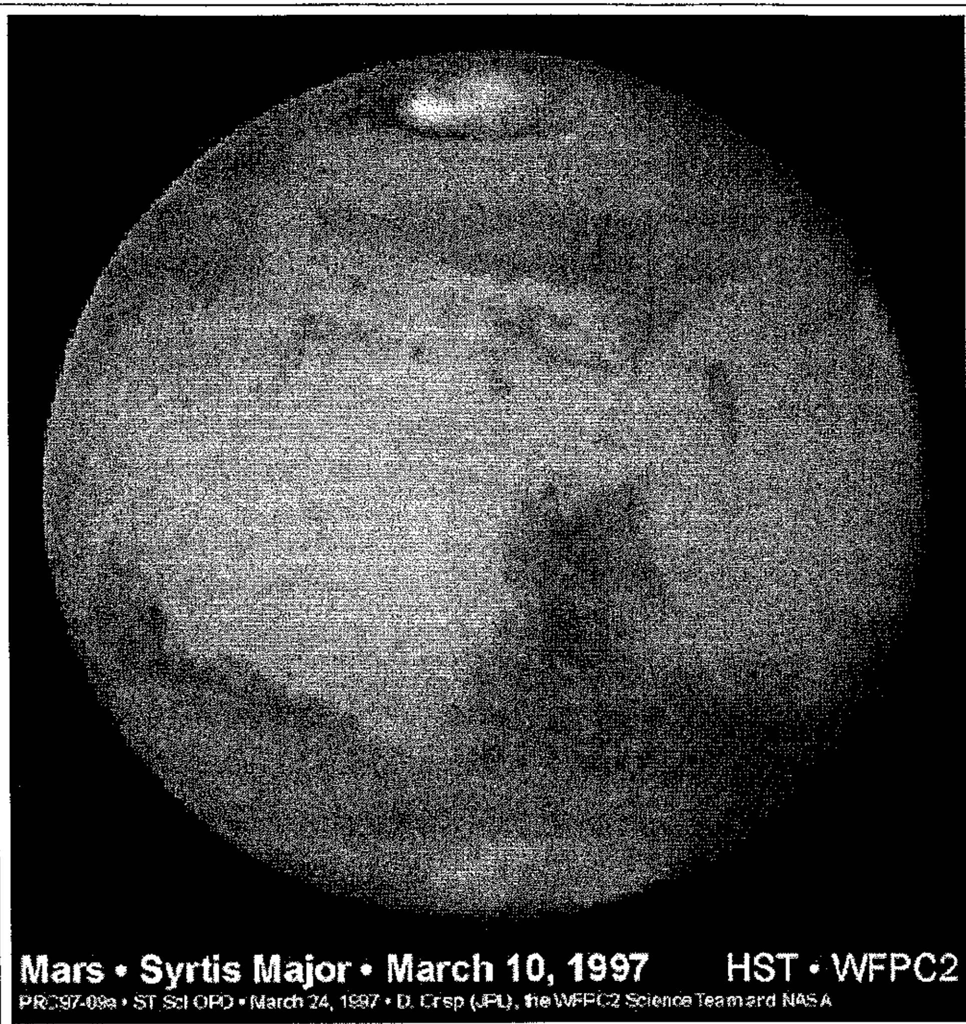
איור 15: רכב החלל "סוג'ורנר", כפי שצולם מרכב-האם "פאת'פיינדר" באתר הנחיתה

ביום העצמאות האמריקני ב-1997 הנחיתו האמריקנים על מאדים את חללית המחקר המתקדמת ביותר שנחתה עד אז. באמצעות כלי-רכב שישה-גלגלי, המצויד במגוון מכשירי סריקה אופטיים וספקטרוסקופיים סרקה החללית את סביבת הנחיתה הקרובה. לא נתגלו עקבות לחיים גם במקרה זה. רכבי מחקר נוספים שנשלחו לא סיימו את משימתם כתוצאה מתקלות שונות, אך המחקר עודנו מעיצומו.

ביולוגים סבורים שמאדים כיום הוא סביבה המחטאת את עצמה על-ידי קרינת אולטרה-סגול הפוגעת בקרקע, יובש הקרקע וחומציותה.

הלחץ האטמוספרי על פני מאדים זהה ללחץ המצוי על כדה"א בגובה 32 ק"מ (0.007 אטמוספרות). היא מורכבת מדו-תחמוצת הפחמן בשיעור של 95.32%, 2.7% חנקן, 1.6% ארגון, חמצן, מים וניאון. למרות שתכולת אדי המים היא רק אלפית מזו הקיימת באטמוספרת כדה"א, נוצרים שם עננים המשייטים בשמים, וערפילי בור בעמקים הם מראה תדיר.





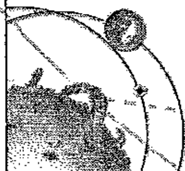
איור 16: מאדים כפי שצולם על-ידי טלסקופ החלל **Hubble**

חלליות "ויקינג" גילו בחורף כיסוי דק של קרח על פני הקרקע, והן "ויקינג" והן ה"פאתפיינדר" שלחו ראיות, שבאתרי הנחיתה היו פעם זרמי מים עצומים.

הטמפרטורה הממוצעת במאדים היא - 63 מעלות צלסיוס. הטמפרטורה המקסימלית מגיעה לסביבות 40^0 C והנמוכה ביותר ל-140^0 C-.

פלנטת מאדים היא הרביעית מהשמש, ומרחקה מהשמש הוא 227,940,000 ק"מ, רדיוסה 3,397 ק"מ ומסתה כעשירית מזו של כדה"א.

יממה אורכת 24.6229 שעות ושנה אורכת 686.98 ימים.



צדק - יופיטר

הפלנטה החמישית במרחקה מהשמש היא גם הגדולה ביותר. מסתה גדולה ממסת כל שאר הפלנטות יחדיו (1.9 E 27 ק"ג, פי 318 מכדה"א) ובנפחה יכולה להכיל יותר מאלף כדורי-ארץ.

רדיוסה 142,800 ק"מ ויש לה 16 ירחים (ראה טבלה).

מרחקה מהשמש: 778,330,000 ק"מ, הפלנטה משלימה הקפה סביב השמש במשך 4332.71 ימים וסיבוב שלם סביב צירה אורך כמעט עשר שעות.



איור 17: "העין האדומה" באטמוספירת צדק

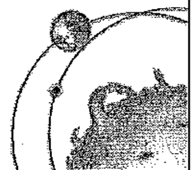
גלילאו צפה בה במאה ה-17 וראה רק ארבעה ירחים שלה הקרויים על שמו - הירחים הגלילאניים: קליסטו, אירופה, גנימד ואיו. לצדק בסך-הכל 16 ירחים ואטמוספרה עמוקה מאוד והדעות בקשר לשאלה אם בכלל יש לו קרקע מוצקה חלוקות בין חוקרים שונים, כך שיש הסוברים שהוא כולו במצב גזי. האטמוספרה שלו מורכבת בעיקר ממימן והליום וכמויות קטנות של מתאן, אמוניה, אדי מים ועוד. הלחץ הברומטרי באטמוספרה נמוך מאשר על פני כדה"א (0.7 אטמוספרות), והטמפרטורה הממוצעת בעננים היא 121- מעלות צלסיוס. הלחץ בשכבות התחתונות כל-כך רב, שאין אלקטרונים יכולים להישאר צמודים לפרוטונים וליצור אטומי מימן. פרוטונים מצטופפים זה לצד זה בעקבות הלחץ ויוצרים מימן במצב מתכתי.

הלחץ העצום בשכבות התחתונות נובע מהמסה של צדק: $10^{27} * 1.9$ ק"ג - פי 318 ממסת כדה"א. לו היתה מסתו גדולה פי 80, היה צדק ניצת לכוכב שני במערכת השמש.

לצדק מערכת של טבעות שהתגלתה על-ידי חללית המחקר "וויאג'ר 1" בשנת 1979. מערכת טבעות זו אינה גדולה ומרשימה כמו זו של שבתאי, והיא לחלוטין בלתי נראית מכדה"א. המערכת מורכבת מהילה פנימית, טבעת ראשית וטבעת גוסאמר שהחללית "גלילאו" גילתה שמדובר בשתי טבעות שונות המוטבעות זו בזו.

כשצופים בצדק הוא נראה כעיגול, שפסים מצוירים עליו לרוחב. פסים אילו הם חלק מהמערך האטמוספרי של צדק המכיל גם עננים וסופות. העננים משתנים בפרקי-זמן מסדר-גודל של שעות או ימים.

סימן ההיכר המעניין ביותר באטמוספרת צדק היא "העין האדומה" או "הכתם האדום הגדול". זוהי סופת הוריקן המתרחשת באטמוספרה של צדק, והיא נעה בכיוון מנוגד לכיוון השעון. בשעת הסופה סיבוב נמשך ארבעה עד שישה ימים, ואילו במרכז התנועה, אם היא קיימת, וכיוונה מקרי בקירוב. כרגיל ידוע לנו שסופות הוריקן, גם הגדולות שבהן, דועכות לאחר פרק-זמן קצר יחסית, אך סופה זו נראתה גם על-ידי גלילאו, כאשר צפה בצדק במאה ה-17. כלומר מדובר כאן בסופה שאורכת כ-400 שנה בקירוב. מהו מקור האנרגיה שלה? זוהי שאלה פתוחה עדיין.



במאי 1999 פרסמו שני צוותי חוקרים מאוניברסיטאות קורנל וקלטק מודל למקור האנרגיה הזה, שלפני בשעת הזריחה על פני צדק התרוממו אזורים שבהם מתרחשות סופות ברקים אדירות בלילה, בכ-50 קילומטרים. התרוממות זו מושכת אנרגיה לשכבות הנראות של הפלנטה. תופעה דומה מתרחשת בסופות ברקים על פני כדה"א. לבסוף סופות מקומיות אלו מצטרפות זו לזו ומזינות את "העין האדומה".

בשולי הפסים באטמוספרה נראות עוד מערבולות (Eddies) וסופות קטנות, אך אף אחת מהן אינה מתקרבת לסדר-גודל של זו.

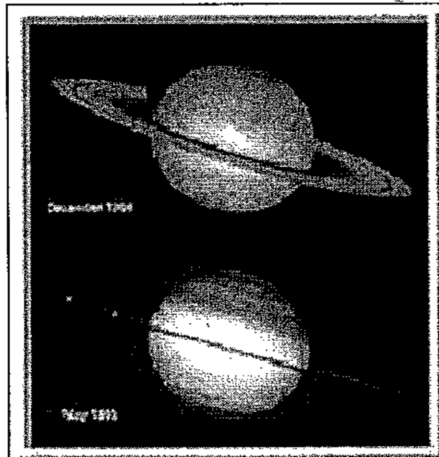
בקטבים של צדק קיימת תופעת האורורה - כמו זוהר הקוטב על פני כדה"א. להבדיל מהתופעה על פני כדה"א שנגרמת מרוח השמש, התופעה על צדק נגרמת כתוצאה מחומר המגיע מאיו - ירחו הקרוב של צדק - ונופל אל הפלנטה דרך הקטבים לאחר שנלכד בקווי השדה המגנטי.

שבתאי - סטורן

הפלנטה השישית במרחקה מהשמש והשנייה בגודלה במערכת השמש ובין העצמים השמימיים המוכרים ביותר בזכות מערכת הטבעות המפוארת שלו. בכל סיפור על כוכבים תמצא את דמותו כמה וכמה פעמים. מרחקו מהשמש 1,429,400,000 ק"מ, מסתו $5.688 * 10^{26}$ ק"ג (פי 95 לערך ממסת כדה"א) ורדיוסו 60,268 ק"מ (פי 9.5 מכדה"א). לשבתאי צפיפות ממוצעת של 0.69, כך שלו הטבלנו אותו במים, הוא היה צף!

אטמוספרת שבתאי מורכבת בעיקר ממימן וכמויות קטנות של הליום ומתאן. באטמוספרה טסות רוחות במהירויות מדהימות: על קו-המשווה מנשבות רוחות בכיוון מזרח במהירויות של כ-500 מטר לשנייה, וככל שנעים בקווי-הרוחב לקווים גבוהים יותר מהירות הרוח יורדת. מקו-רוחב 35 והלאה כיוון הרוח משתנה, פעם למערב ופעם למזרח. הלחץ הברומטרי הוא פי 1.4 מאשר על כדה"א, וטמפרטורת העננים שלו היא -125^0 C.

רוב ידיעותינו עליו הגיעו מהמחקר, שנערך על ידי החללית "וויאג'ר בשנים 1980-1981. שבתאי נראה פחוס מאוד יחסית בקטביו, תוצאה של סיבוב מהיר מאוד סביב עצמו.



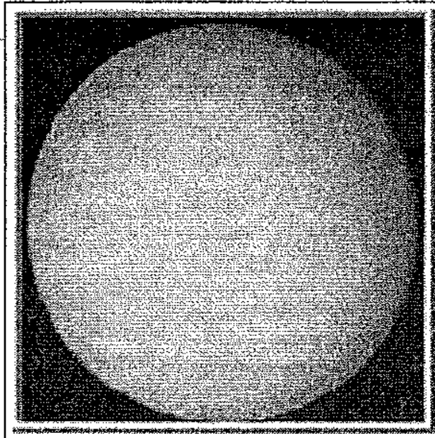
איור 18: שבתאי וטבעותיו - שימו לב לרוחב הניכר של הטבעות ולדקיקותן

יממה על פניו אורכת רק 10 שעות ו-39 דקות. שנה שלו אורכת 29.5 שנות ארץ. רוחב מערכת הטבעות המיוחדת אותו הוא במסדר-גודל של מאות אלפי ק"מ, בעוד עוביין מגיע רק לכ-15 ק"מ בלבד. היא מורכבת מחלקים שונים הכוללים את הטבעות הבהירות יותר: A ו-B ואת החיוורת יותר - C, שגם הן מורכבות מתת-טבעות עדינות יותר, ויש במערכת מספר מרווחים. מקור הטבעות לחלוטין לא ברור, וקיימות שתי סברות מובילות: האחת - ירח שהתנפץ עקב מפגש עם גוף אחר כמו שביט או אסטרואיד, והשנייה היא שכוח המשיכה העצום של הפלנטה לא אפשר כלל לרסיסים אלה להתאחד לירח והוא נותר כאוסף חלקיקים. הרכבן אינו ברור, אך נראה שיש בהן כמויות גדולות של מים, וייתכן שהן עשויות מקרחונים וכדורי שלג, שגודלם ממספר סנטימטרים ועד מספר מטרים.

לשבתאי 18 ירחים וייתכן שיש עוד ארבעה, כפי שנצפה על-ידי טלסקופ החלל האבל ב-1995.

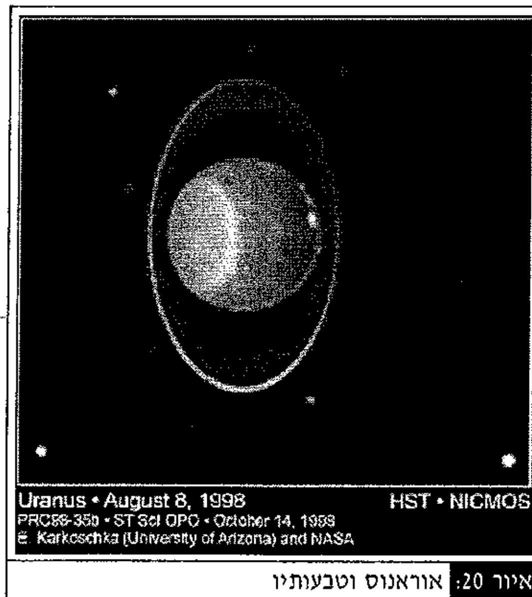


אורנוס

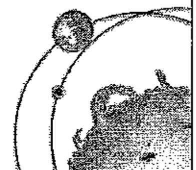

איור 19: פניו החלקים של אורנוס

כוכב-הלכת השביעי במערכת השמש הוא אורנוס, שגם לו מערכת של טבעות סביבו, וכפי שהאוריינטציה המרחבית שלהן מצביעה, הרי שציר הסיבוב של אורנוס אופקי בשעה שצירי הסיבוב של שאר הפלנטות (פרט לפלוטו, שאותו נכיר בהמשך) אנכיים בקירוב. הגורם לכך כנראה הוא מפגש על גוף בגודל של פלנטה בימים הראשונים של מערכת השמש. חללית המחקר "וויאג'ר 2" מצאה שהשפעת האוריינטציה הזו ניכרת בעיקר בשדה המגנטי הנטוי בעצמו 60 מעלות מציר הסיבוב, והמגנטוספרה נמשכת אל מאחורי הפלנטה. מקור השדה המגנטי אינו ידוע, היו שסברו שקיים אוקיאנוס של מים ואמוניה המצוי בלחץ גבוה ומוליך חשמלית, אך כנראה הוא אינו קיים, בכוכבי-לכת אחרים, ובכלל כדה"א, סבורים שמקור השדה המגנטי הוא בגלעין המותך. כוכב-הלכת התגלה על ידי וויליאם הרשל ב-1781 במרחק של 2.87 מיליארד ק"מ מהשמש. קוטרו בקו-המשווה הוא 51,800 ק"מ, מסתו היא פי 14.5 בכדה"א, הוא סובב סביב השמש אחת ל-84.01 שנים, ויממה על פניו אורכת 17 שעות ו-14 דקות.

הלחץ האטמוספרי עליו גדול פי 1.2 משל כדה"א וטמפרטורת העננים הממוצעת שלו היא -193^0 C. האטמוספרה שלו מורכבת מ-83% מימן, 15% הליום ו-2% מתאן המצוי בשכבות העליונות של האטמוספרה, המתאן בולע את הצבע האדום הנופל על הפלנטה ונותן לה את צבעה התכול-ירוק האופייני. עננים מסודרים בקווי-רוחב קבועים בדומה לצדק, והרוחות מנשבות בעיקר בכיוון הסיבוב של הפלנטה במהירויות של 40-160 מטר לשנייה.
מערכת הטבעות של אורנוס התגלתה בשנת 1977 במהלך ביקור החללית "וויאג'ר" ונראה שהוא מורכב בעיקר מקרחונים ואבק עדין.

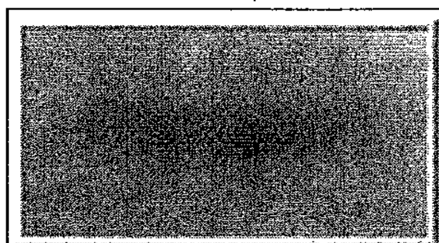


איור 20: אורנוס וטבעותיו



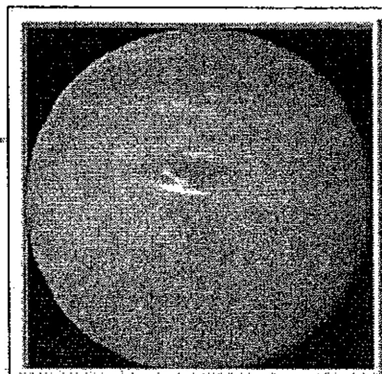
נפטון

נפטון הוא החיצוני מבין ארבעת הענקים הגזיים והוא השמיני בין כוכבי-הלכת במרחקו מהשמש.


איור 21: הכתם הכהה הגדול על נפטון

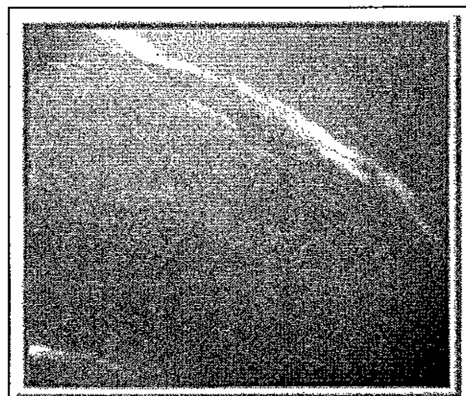
קוטרו בקו-המשווה 49,500 ק"מ, ובנפחו הוא יכול להכיל את כדה"א כ-60 פעם. שנה על פניו נמשכת 165 שנה, יש לו 8 ירחים, שישה מהם התגלו על ידי חללית המחקר "וויאג'ר".
יממה על נפטון אורכת 16 שעות ו-6.7 דקות. הוא התגלה ב-23 בספטמבר 1846 על-ידי ג'והן גוטפריד גלה ממצפה הכוכבים בברלין ולואיס ד'ארסט - סטודנט לאסטרונומיה, על-פי חישובים שבוצעו על-ידי אורביין ג'ין ג'וזף ליואריאר.

לנפטון אטמוספרה פעילה עם סופות דמויות הוריקן כמו על צדק. האזור הידוע ביותר הוא "הכתם הכהה הגדול" - בערך בגודל כדה"א ודומה לכתם האדום של צדק.


איור 22: פני נפטון

החללית "וויאג'ר" גילתה עננים לא סדירים, הסובבים את נפטון פעם ב-16 שעות לערך, ייתכן שעננות זו מתנהגת כנוצה המשייטת מעל מצע עננים צפוף ונמוך יותר.
עוד גילתה החללית עננים בהירים, הדומים לענני צירוס המצויים בכדור-הארץ, באטמוספרה העליונה של נפטון. בקווי-אורך צפוניים גילתה "וויאג'ר" עננים המצילים על עננים נמוכים מהם. הטמפרטורה הממוצעת בעננים נעה בין 153- ל-193- מעלות צלסיוס. על נפטון נמדדו מהירויות הרוח הגבוהות ביותר שנמדדו על פלנטה כלשהי, באזור הכתם הכהה מהירות הרוח יכולה להגיע עד 2,000 קמ"ש.

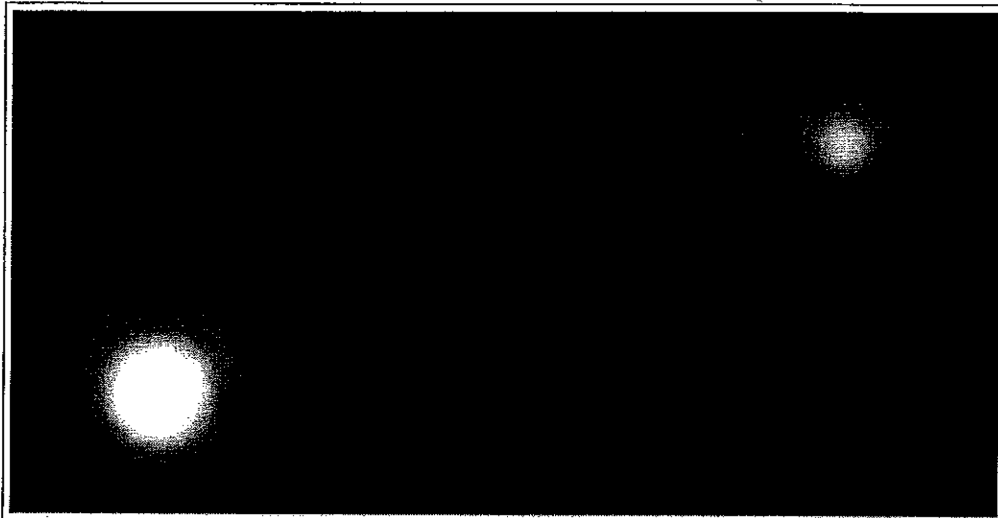
לנפטון מערכת של ארבע טבעות העשויות אבק, ומשערים שהן נוצרו על-ידי מטאוריטים שהתרסקו על ירחים של הפלנטה. החללית "וויאג'ר 2" שלחה תמונות המראות את המבנה של טבעות אלו.
השדה המגנטי של נפטון מצוי בהסטה של 47 מעלות מציר הסיבוב של הפלנטה.


איור 23: עננות באזור הכתם הכהה



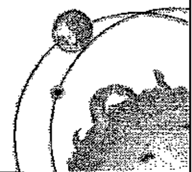
פלוטו

הפלנטה האחרונה במרחקה מהשמש היא פלוטו. מרחקה הממוצע מהשמש הוא 5,913,520,000 ק״מ (כמעט פי 40 ממרחקו של כדה״א מהשמש). זוהי הפלנטה היחידה שאותה לא ביקרה חללית מחקר, ולכן הידע שלנו עליה קטן יחסית. המסה של פלנטה קטנה זו $1.27\ 10^{22}$ ק״ג, כלומר 0.02 ממסת כדה״א. רדיוסה 1,137 ק״מ - כשישית מרדיוס כדה״א, קטן יותר מהירח, כוח המשיכה חלש במיוחד - 0.4 מטר לשנייה[2]. יממה בפלוטו אורכת שש יממות ארץ, ושנה אורכת 248.5 שנות ארץ. לפלוטו ירח הקרוי כרון ומסתו של פלוטו גדולה רק פי שבעה ממסת כרון. לשם השוואה, מסת כדה״א גדולה פי 81 ממסת הירח. ולכן פלוטו וכרון נעולים זה מול זה על-ידי כוחות גאות - הם כל הזמן מפנים זה לזה אותו צד. עם זאת הרכבם שונה וצפיפותו של פלוטו גדולה כמעט פי שניים מזו של כרון, כלומר הם נוצרו בנפרד ואינם קשורים היסטורית זה לזה.

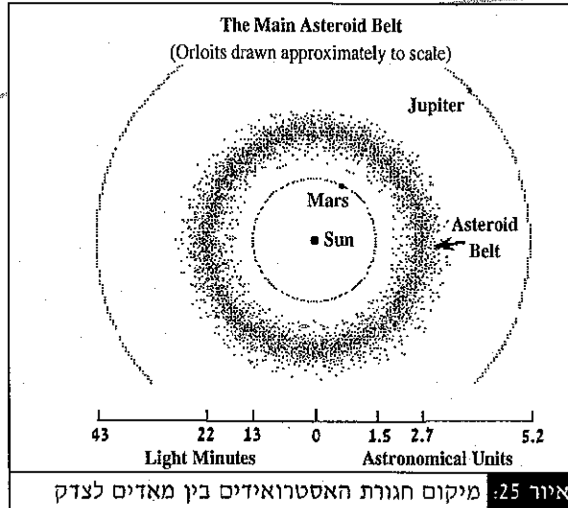


איור 24: פלוטו וירחו כרון. שים לב לגודל הדומה שלהם

סיפור גילוי הפלנטה הוא סיפור של חיפוש שיטתי: פרסיבל לאוול, מי שייסד את מצפה לאוול בפלאגסטף, אריזונה, חושב היכן אמור הגוף המפריע לפלנטה נפטון להיות. לאוול הקדיש מאמצים רבים לגילוי פלנטת-X. בימיו נוסף לטלסקופ גם סרט צילום, ועיקר החקירה נעשתה בעזרת ניתוח סרטי צילום. כעשר שנים לאחר מות של לאוול הטיל מנהל המצפה, ד״ר ווסטו סליפר, את החיפוש על קלייד טומבוף, חובב אסטרונומיה אלמוני, שישב ועיין בצילומים של מערכת השמש, שצולמו פעם בשבועיים. היה זה תפקיד אפור הדורש סבלנות ברזל וקפדנות צבאית. מבין אלפי כוכבים שהופיעו בתצלומים שבהם עיין, היה עליו למצוא גוף שהוזז במעט ביחס לכוכבי-השבת. בנוסף לכשרון ולנחישות, האיר המזל פניו לטומבוף הצעיר, ואכן הוא גילה את הפלנטה בפברואר 1930.



אסטרואידים

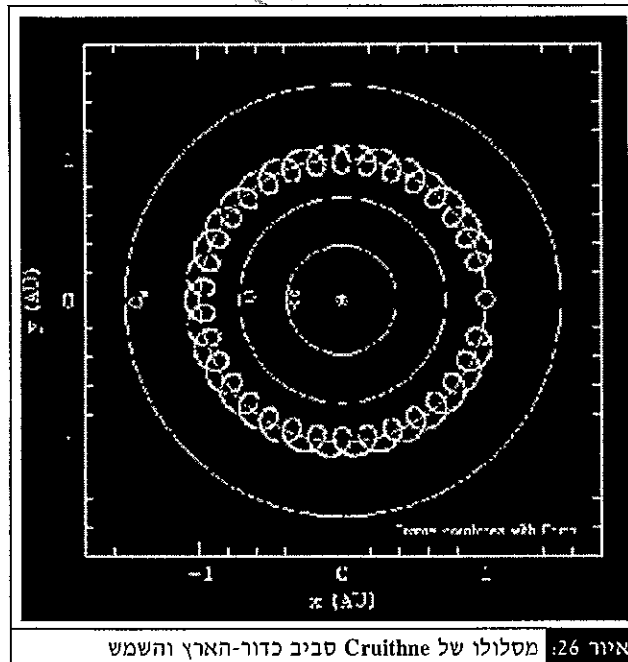


איור 25: מיקום חגורת האסטרואידים בין מאדים לצדק

אסטרואידים הם שאריות מהיווצרות מערכת השמש. הם סובבים את השמש במסלולים שונים, חלקם פנימיים לכדור-הארץ סביב השמש, וחלקם מגיעים עד מעבר למסלול שבתאי, אולם רובם מצויים באזור בין מאדים לצדק, הקרוי חגורת האסטרואידים הראשית. יש מהם גדולים יחסית כמו קרס שקוטרו כמעט 1,000 ק״מ ויש קטנים בגודל של אבני חצץ. קיימים 16 אסטרואידים שקוטרם גדול מ-240 ק״מ.

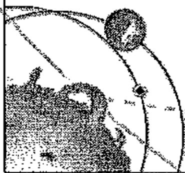
לחלקם יש נתיבים החוצים את מסלול כדה״א, יש אחד הקרוי Cruithne: (**Near Earth Asteroid** **3753**) בעל מסלול הסובב סביב כדה״א והשמש בו-זמנית.

יש עדויות לגבי פגיעת אסטרואידים בכדה״א והעקבות שהותירו כמכתשים. אסטרואיד המצוי בנתיב התנגשות עם כדה״א קרוי מטאוריד, כאשר מטאוריד פוגע בכדה״א, הוא נשרף באטמוספרה וקרוי מטאור, אם הוא לא נשרף עד סופו החלק המגיע אל הקרקע קרוי מטאוריט. 92.8% מהמטאוריטים עשויים מסיליקטים - אבנים, 5.7% עשויים ברזל וניקל, והשאר הם תערובת של שלושת החומרים. המטאורים העשויים סיליקה הם הקשים ביותר לזיהוי כגופים, שמקורם מחוץ לכדה״א, מאחר שהם דומים מאד לאבנים רגילות.



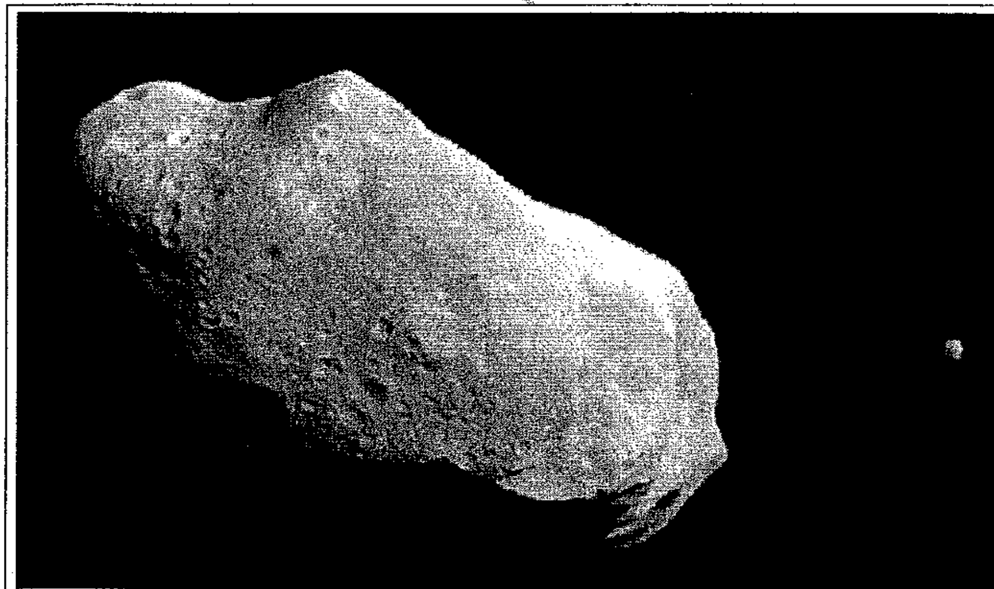
איור 26: מסלולו של **Cruithne** סביב כדור-הארץ והשמש

שתי השערות עיקריות למקורם של האסטרואידים: האחת, הייתה פלנטה שהושמדה לאחר התנגשות עם גרם שמימי כלשהו. השנייה, המקובלת יותר, היא שהאסטרואידים לא הצליחו מעולם להתגבש לפלנטה. בחישובים שנערכו אם אכן הייתה זו פלנטה, המדובר בפלנטה קטנה מאוד שקוטרה פחות מ-1,500 ק״מ.

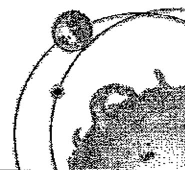


חקירתם של האסטרואידים יכולה לשפוך אור על שאלות היווצרות מערכת השמש וראשית החיים, לכן הם נחקרים בצורה אינטנסיבית למדיי יחסית לגודלם. עד 1991 הם נחקרו רק על-ידי טלסקופים קרקעיים, ובשנה זו הגיעה לאזור חללית המחקר "גלילאו", שחקרה את האסטרואידים גספרה ואידה ושלחה תמונות ומידע רב-ערך. בימים אלו החללית **NEAR** פועלת באזור החגורה וממפה אסטרואידים כמו האחרון שבהם - ארוס.

מידע שהגיע מחלליות המחקר מצביע על-כך שחגורת האסטרואידים אינה צפופה, וקיימים מרווחים ניכרים ביניהם.



איור 27: האסטרואיד אידה וירחו דקטיל



שביטים

לו טסנו במהירות האור מהשמש החוצה, היינו מגיעים אל הפלנטה פלוטו לאחר 5 שעות טיסה. לאחריה היה נתיב הטיסה ריק למדיי (עד כמה שידוע כיום), עד שהיינו טסים כשבועיים. שם, במרחק של שבועיים אור מהשמש, מצוי הגבול החיצוני של מערכת השמש - ענן אורט (Oort). ענן זה מורכב מגושי קרח ואבק הנעים סביב השמש בקליפה כדורית.

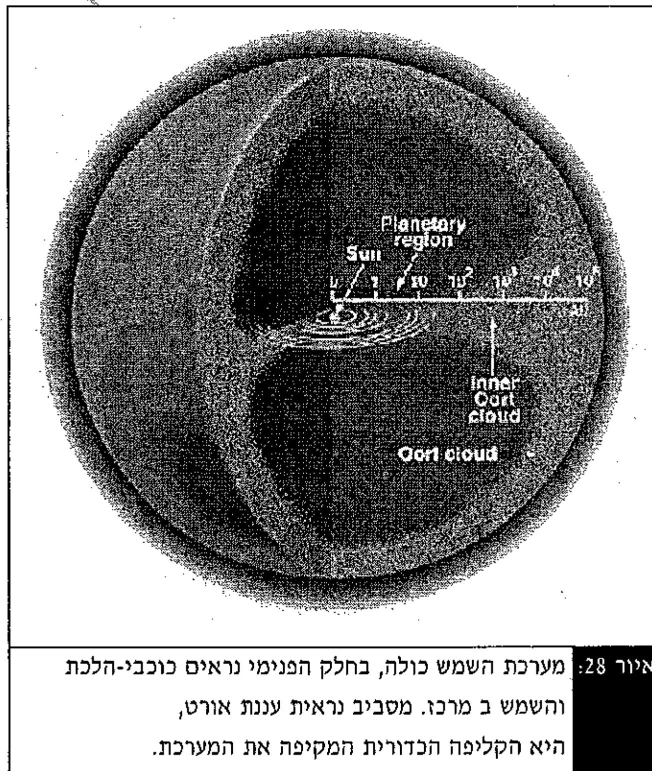
לעתים קורה ששני גושים מתנגשים, עוברים בסמוך או מופרעים על-ידי גוף כלשהו ומשנים את כיוונם. במקרה שהכיוון החדש שהתקבל היה אל תוך מערכת השמש, הם יימשכו על-ידי השמש וייכנסו אל מערכת השמש הפנימית. אנו נראה אותם כשביטים.

לשביטים יש מקורות נוספים במערכת השמש כמו חגורת קויפר, וגם משם הם מגיעים לביקור.

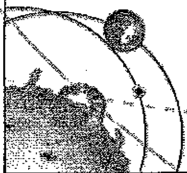
השביטים מחגורת קויפר מגיעים במסלול המצוי על דיסקת מערכת השמש, בעוד השביטים מענן אורט יכולים להגיע בכל כיוון ואף בניצב לדיסקה.

כאשר השביטים מתקרבים אל השמש עד למרחק של מספר יחידות אסטרונומיות (150,000,000 ק״מ - המרחק בין כדור-הארץ לשמש), טמפרטורת פני השטח שלהם עולה, ומולקולות גז קפוא מתחילות להתאדות תוך שהן נושאות עמן חלקיקי אבק. הקרח מתאדה מיד לגז, מאחר שאין לחץ האטמוספרי בסביבה. החלקיקים המתנדפים יוצרים את ה״קומה״ (Coma), שהיא הראש התפוח של השביט. ההחזרה של החלקיקים טובה יותר מאשר ההחזרה של גרעין השביט, וכך קל יותר לאתר אותו. בין היתר מוקרן על השביט אור אולטרה-סגול, שמזרז תהליכים כימיים הגורמים לשביט לפלוט מימן, היוצר את מעטפת המימן שאינה נראית בכדה״א עקב האטמוספרה.

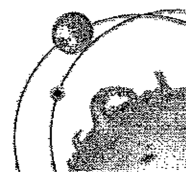
ככל שהשביט מתקרב אל השמש, הלחץ שרוח השמש מפעילה עליו גובר וגורם לאדים שלו להימתח בכיוון המנוגד לשמש, וכך נוצר הזנב המרהיב, שהוא סימן ההיכר של שביטים. לשביטים יש שני זנבות למעשה: זנב אבק, צבעו לבן קרמי והוא מורכב מחלקיקים כבדים יותר, ולכן נראה מכופף קמעה, השני הוא זנב יוני המורכב מיונים קלים הזוהרים בצבע כחולעקב האינטראקציה עם החלקיקים הטעונים המגיעים מהשמש. מאחר שחלקיקים אלו קלים הרבה יותר מתקבל זנב כחלחל הנמתח ישר בניגוד לכיוון השמש.



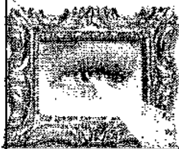
איור 28: מערכת השמש כולה, בחלק הפנימי נראים כוכבי-הלכת והשמש ב מרכז. מסביב נראית ענגת אורט, היא הקליפה הכדורית המקיפה את המערכת.



איור 29: השביט הייל-בופפ - שים לב לשני זנבות: הזנב היוני הכחול וזנב האבק הלבן.
הזנב הכול מתוח בניגוד לכיוון בו נמצאת השמש



פרק ח': חום וצבע



מבוא

קרינת החום שידועה גם בשם קרינת גוף שחור, היא תופעה שהעסיקה את המדענים בסוף המאה ה-19. פענוחה בראשית המאה ה-20 על-ידי מקס פלנק היווה תפנית מהפכנית בהתפתחות הפיזיקה. מקס פלנק הניח את היסוד לתורת הקוונטים, כאשר טבע את המושג קוונט של אנרגיה בשנת 1900, כחלק מהסברו לנתונים, שהיו ידועים לגבי קרינת חום.

בלימוד הפיזיקה המודרנית בבית-הספר התיכון התלמיד נתקל בדרך-כלל נתקל בשמו של פלנק רק דרך השימוש בקבוע פלנק בפרקים שעוסקים באפקט הפוטואלקטרי, במודל אטום המימן של בוהר וכו׳. יש להניח שמעצבי תכניות הלימודים בפיזיקה בבית-הספר התיכון העדיפו להימנע מטיפול בסוגיית הגוף השחור בשל מידת הסיבוך המתמטי של המודל של פלנק (ומודלים אחרים שהוצעו לפני כן).

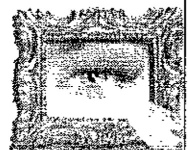
כשמבקשים מתלמיד תיכון שסיים את לימודי הפיזיקה לציין מה אומר לו המושג ״ספקטרום״, התשובה שמקבלים בדרך-כלל היא: אוסף הצבעים שקיימים באור הלבן. כלומר האסוציאציה העיקרית שקיימת מתייחסת להרכב התדירויות שקיים בספקטרום, שמתבטא בייצוג החזותי (תבנית צבעונית שמתקבלת על-ידי שבירה במנסרה או על-ידי עקיפה בסריג), ולא לעוצמה היחסית של המרכיבים השונים. זו גם התשובה שנותנים חלק מהמורים. לימוד נושא קרינת החום מצריך התייחסות לשני המשתנים שמאפיינים ספקטרום של מקור כלשהו: תדירות ועוצמה. תיאור הקשר בין שני המשתנים הללו במקרה של קרינת חום הוא, למעשה, הצגת הבעיה שאתה התמודדו הפיזיקאים בסוף המאה ה-19. כמו-כן מתעורר הצורך להשתמש בייצוג גרפי של הספקטרום (עוצמה כתלות באורך גל או תדירות). ההיכרות עם מושג הספקטרום דרך יותר מייצוג אחד שלו עשויה לשפר את הבנת המושג.

אנו רואים לנכון לטפל בנושא קרינת החום תוך התמקדות בהבנה האיכותית של התופעה, בתפקיד החשוב שמילאה בהתפתחות הפיזיקה ובמשמעויות המעשיות שלה בהקשר של האסטרונומיה - לניתוח הספקטרלי של קרינת גוף שחור ישנו יישום נרחב באסטרונומיה. בנוסף לכך, בהקשר הכללי של לימודי הפיזיקה התיכונית לימוד הנושא מאפשר:

1. יצירת הבנה מעמיקה וכוללת יותר של מושג הספקטרום, וזאת בגלל הצורך להתייחס לעוצמה כמאפיין נוסף של קרינה אלקטרומגנטית (ולא רק לתדירות), לייצוג הגרפי של הספקטרום, בנוסף לייצוג החזותי שלו, ולקשר שבין הצבע של גופים מאירים ובין הספקטרום שלהם.
2. הפיכת החיבור בין לימוד הפיזיקה המודרנית ללימוד האופטיקה הפיזיקלית ליותר טבעי.

מושגות תובנות נוספות מלימוד הנושא, שרלוונטיות גם לנושאים אחרים:

1. דרך לימוד נושא קרינת החום מודגש הצורך לעבור לעתים ממודל אחד למודל אחר (כאשר ברקע קיימות דוגמאות מעטות: ממודל חלקיקי לגלי, מבנה האטום).
2. עיון מסודר במודלים המתמטיים השונים, שהוצעו כהסבר לתופעת קרינת החום, מלמד אותנו שבדומה למקרים אחרים בהתפתחות ההיסטורית של הפיזיקה, התאוריה החדשה מכילה את התאוריה שקדמה לה כמקרה פרטי.
3. בהסבר התופעה ישנו עירוב רעיונות קלאסיים בתאוריה מודרנית ולהפך (גל עומד, גישה סטטיסטית מול דטרמיניזם, התפלגות בולצמן), תופעה שחוזרת מאוחר יותר במודל אטום המימן של בוהר.



מבנה הפרק

פעילות 19: ספקטרום כמזהה מקורות אור

התלמיד משתמש בסריג עקיפה שמאפשר לו לקבל ספקטרום של מקורות אור שונים, ומגלה שהספקטרום הנו תכונה שמאפיינת מקורות אור. כמו-כן הוא לומד שניתן לחלק את מקורות האור לשתי קבוצות: מקורות שהספקטרום שלהם רציף, ומקורות שהספקטרום שלהם אינו רציף, אלא בדיד.

התלמיד בודק את הקשר בין צבע האור שפולטים מקורות שונים ובין הספקטרום שלהם. בדיקה זו מחייבת אותו להתייחס לעוצמה היחסית של מרכיביו השונים של הספקטרום, גם לגבי מקורות שהספקטרום שלהם רציף וגם לגבי מקורות שהספקטרום שלהם בדיד.

משלב זה ואילך מתמקדים במקורות בעלי ספקטרום רציף - גופים צפופים, ובודקים שורה של שאלות:

מה פירוש הביטוי ספקטרום רציף, או במילים אחרות: ניסיון לספור כמה צבעים יש בספקטרום של נורת להט.

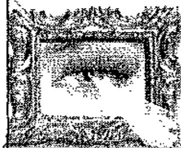
בונים "תוחם צבעים" פשוט, שמאפשר ליצור סדרת גוונים סופית מרצף הגוונים בספקטרום הפליטה של נורת הלהט. כאשר מזיזים את "תוחם הצבעים", משתנה הרכב הצבעים שנראה בו. הניסיון לקבוע את מספר הגוונים שיש בספקטרום הרציף נכשל, מה שמוביל למסקנה שמספר הגוונים הנו אינסופי.

פעילות 20: כיצד מושפע הספקטרום של גופים צפופים מהטמפרטורה שלהם?

שאלה זו נבדקת תחילה בצורה איכותית. בחלקים א' ו-ב' מבררים מה קורה ללהבת מבער, כאשר אספקת האוויר משתנה. בתור אינדיקציה לטמפרטורת הלהבה בתנאים השונים, מחממים כמות נתונה של מים במשך זמן נתון. ראוי להדגיש כאן כי להבת המבער **איננה** גוף צפוף, ולכן הקשר שיתברר בהמשך בין הטמפרטורה ובין הספקטרום של גופים צפופים אינו חל עליה. עם זאת הפעילות המובאת כאן מיועדת לשמש דוגמה למצב, שבו שינוי צבע האור קשור בשינוי טמפרטורת המקור.

ניתן לוותר על חלקים א' ו-ב' ולגשת ישירות לביצוע חלק ג', אם מניחים שלתלמידים ברור כי הטמפרטורה של נורת להט משתנה, כאשר משנים את מתח המקור שאליו היא מחוברת.

בחלק ג' מתייחסים גם לצד ה"כמותי": מודדים את העוצמה היחסית של מרכיבים שונים בספקטרום הרציף המרכיב הכחול והמרכיב האדום. מתברר שהיחס בין עוצמת המרכיב הכחול לבין עוצמת המרכיב האדום קטן, כאשר הטמפרטורה יורדת וצבע האור נעשה יותר אדמדם.



פעילות 21: האם התחום האדום הינו קצה הספקטרום, או שהספקטרום נמשך גם מעבר לתחום האדום?

בחלקה הראשון של הפעילות משחזרים את הניסוי של הרשל, שגילה את קיומה של הקרינה האינפרה-אדומה, קרינה שאינה נראית בעין; בחלק השני בודקים אחדות מתכונותיה של קרינה זו תוך השוואה עם אור רגיל.

פעילות 22: בהמשך לפעילות 20: האם ניתן לקבוע את הטמפרטורה של גופים צפופים בעזרת הספקטרום שלהם? ואם כן, כיצד?

פעילות זו מבוססת על ניתוח של איור 1, שבו מוצג ספקטרום רציף שנפלט מגופים בטמפרטורות שונות. הקרינה שנפלטת מכל אחד מהגופים מיוצגת באמצעות גרף עוצמה יחסית כתלות באורך הגל. הצורה הכללית של כל הגרפים דומה - באורך גל מסוים מתקבלת עוצמה מקסימלית. בעזרת נתונים שמתקבלים מהגרפים שבאיור, מגיעים לחוק של וויין, שקושר בין אורך הגל שבו מתקבלת העוצמה המקסימלית ובין הטמפרטורה. למעשה, בפעילות זו מושגת המטרה העיקרית של פרק ו - להכיר את החוק של וויין כדי להבין כיצד מודדים טמפרטורה מרחוק, לדוגמה את זו של כוכבים.

ידע מוקדם

לימוד הפרק מצריך היכרות עם מושגי יסוד מתחום הגלים (בעיקר מושג אורך הגל) ועם תחום אורכי הגל של האור הנראה.

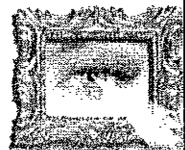
תכנון זמן ההוראה

פעילות 19: ספקטרום כמזהה מקורות אור - שני שיעורים

פעילות 20: קרינת חום - שלושה שיעורים, כאשר השיעור השלישי - מתוקשב.
אם אין גישה לכיתת מחשבים מקושרים לאינטרנט, אפשר לתת כשיעורי-בית.

פעילות 21: ראיית הבלתי נראה - חלק א׳ - שיעור אחד, חלק ב׳ - עבודת בית.

פעילות 22: מדידת טמפרטורה של כוכבים חוק Wein - שיעור אחד.



פעילות 19: ספקטרום כמזהה מקורות אור

מה דעתך (1)?

שתי השאלות שמופיעות כאן מיועדות לגרום לתלמיד לנסות **לשער** מדוע האור של מקורות אור מסוימים צבעוני. השאלה הראשונה קשורה לשימוש בחומר צפוף בתור מקור אור ובמסננים; ואילו השאלה השנייה לשימוש בשפופרות גז קלוש בתור מקור האור.

כמו במקרים אחרים, המורה אינו מספק בשלב זה מידע זה או אחר - הוא אינו אמור להגיב לתשובות התלמידים לשאלות שבחוברת, ואף לא לתת תשובות לשאלות אחרות שיעלו מצדם.

חלק א: התבוננות במקורות אור שונים דרך סריג עקיפה

מהלך הפעילות

בתחילת לימודי האופטיקה, בשלב המבוא הכללי, נוהגים חלק מהמורים להציג (בדרך-כלל כהדגמות) מגוון תופעות שקשורות להתנהגות האור, כדרך לעורר את התעניינות התלמידים. אחת מאלה היא תופעת הנפיצה - קבלת ספקטרום הגוונים של האור הלבן, שמודגמת באמצעות מנסרה משולשת. להסבר הפיזיקלי שקשור לדרך שבה תופעת הנפיצה מתקבלת בעזרת המנסרה, מגיעים מאוחר יותר.

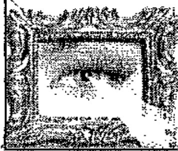
במקרה של קבלת הספקטרום בעזרת סריג עקיפה, סדר הדברים בדרך-כלל שונה: קודם לומדים את פרקי האופטיקה הפיזיקלית ואת עקרון קבלת תבנית העקיפה על-ידי סריג, ואחר-כך לומדים להשתמש בו כדי לקבל ספקטרום וכן לבצע בעזרתו מדידה של אורכי גל.

בפעילות זו החלטנו לשלב שימוש בסריג עקיפה לשם קבלת ספקטרום, בלי קשר לשאלה האם נושא האופטיקה הפיזיקלית נלמד כבר, משני טעמים:

1. התלמידים יותר פעילים, באשר כל תלמיד (או שניים, תלוי במספר הסריגים שעומד לרשות המורה) צופה בספקטרום דרך סריג, שאותו הוא אוחז בידו, במקום לצפות בהדגמה שהמורה מדגים.
2. כדי לקבל תמונה די בהירה של ספקטרום (רציף) בעזרת מנסרה, דרושים מנורה בעלת הספק גבוה יחסית ותנאי חושך טובים בכיתה; כשמדובר על מקורות שהספקטרום שלהם קווי - שפופרות גז קלוש שמצויות בדרך-כלל במעבדה לפיזיקה, העוצמה נמוכה מדיי.

שלב א: בשלב זה התלמיד מתבקש לצפות בתבנית הצבעונית שיוצר הסריג מאורה של נורת להט, ולשים לב לקשר שבין צבע האור ובין הכיוון שממנו הוא נראה. אם המושג "ספקטרום" עדיין לא מוכר לתלמידים, זהו הרגע לעשות היכרות **ראשונית** ולהגדיר זמנית את המושג כאוסף המרכיבים של האור הנוצר על-ידי מקור נתון.

שלב ב: בשלב זה מתברר לתלמיד שספקטרום האור של מקורות מסוימים הנו בעל אופי שונה - התבנית הצבעונית אינה רציפה, יש בה הפסקות. לכן ניתן לחלק את מקורות האור לשני סוגים - כאלה שהספקטרום שלהם רציף, ללא הפסקות, וכאלה שהספקטרום שלהם אינו רציף - עם הפסקות. כאן רצוי להוסיף את המושגים

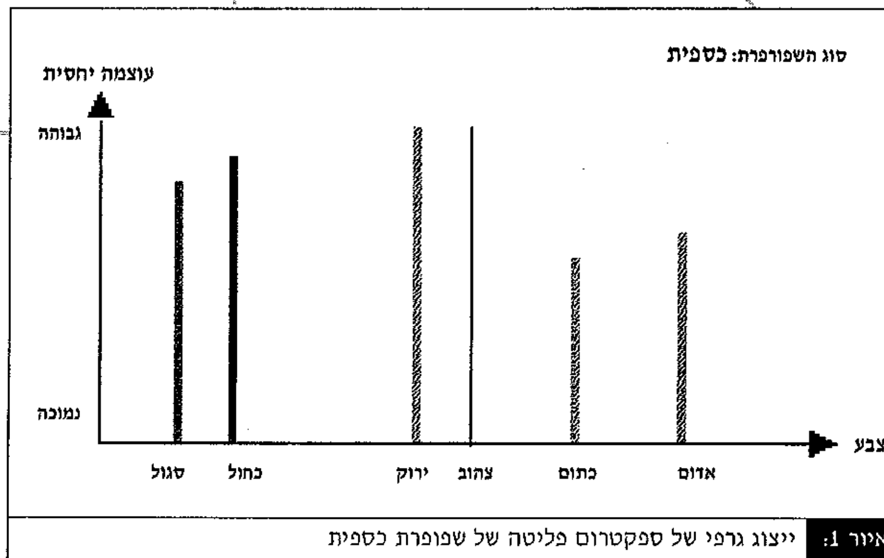


ספקטרום "רציף" וספקטרום "בדיד" או "קווי".

בנוסף לקיומם של שני סוגי ספקטרום, התלמיד מתבקש לשים לב לכך שלמרכיבים שונים של הספקטרום יש עוצמה יחסית שונה. קל יותר להבחין בעובדה זו בספקטרום הבדיד, וזו אחת הסיבות ששילבנו צפייה במקורות בעלי ספקטרום קווי בפעילות, למרות שהנושא המרכזי של הפרק קשור בניתוח הספקטרום הרציף.

סיכום התצפיות

1. המטרה היא להגדיר מחדש את המושג "ספקטרום" של מקור אור, הפעם באופן חצי כמותי - להגדרה הקודמת נוסף ממד העוצמה היחסית. השימוש במושג "ספקטרום פליטה" מהווה גם רמז או הכנה לכך שבהמשך (סעיף 6) ייתקל התלמיד במושג "ספקטרום בליעה".
2. בשלב זה התלמיד פוגש ייצוג נוסף של ספקטרום - ייצוג גרפי של התפלגות העוצמה היחסית כתלות בצבע.
3. הגרף המתקבל כאן אמור להיות גרף עמודות, ויכול להיות כדוגמת זה שבאיור 1.

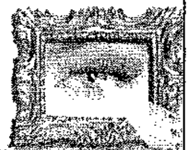


איור 1: ייצוג גרפי של ספקטרום פליטה של שפופרת כספית

התלמיד מתבקש גם לשים לב לגון האור הנפלט מהשפופרת. הגוון של שפופרת הכספית שהבאנו כאן כדוגמה הינו לבן-כחלחל.

4. בדומה לסעיף הקודם, התלמיד מתבונן בספקטרום של שפופרת גז קלוש, מתאר אותו בגרף התפלגות עוצמה כתלות בצבע ומתרשם מגון האור.

   בנוסף, התלמיד מתבקש לציין קשר בין צבעו של האור ובין הספקטרום: צבע האור מושפע בעיקר מהמרכיבים שעוצמתם היחסית גבוהה. ראוי לציין כאן שלעין רגישות שונה לחלקים שונים של הספקטרום (הרגישות הגבוהה ביותר היא למרכיב הירוק), ולכן יחסי העוצמות הנראות בעין שונים מיחסי העוצמות האמיתיות.



5. בסעיף זה מופיעים שלושה מרכיבים נוספים שקשורים למושג הספקטרום:
- זיהוי גון האור כשנתון תחום אורכי הגל.
- הקבלה בין ייצוג ספקטרום על-ידי גרף התפלגות עוצמה ועל-ידי תצלום.
- המושג ספקטרום בליעה אשר לו יש שימוש נרחב באסטרונומיה.

באיור 5 רואים שנפילות העוצמה (השקעים בגרף) מתאימות לאזורים הכהים (פחות מוארים) בתצלום. ספקטרום בליעה מתקבל, כאשר חלקים מסוימים של ספקטרום רציף נבלעים על-ידי חומר שנמצא בין המקור שפולט את הספקטרום הרציף ובין הצופה.
תחום אורכי הגל באיור הנו בין 4,000 ל-4,300 אנגסטרם, תחום די צר. מתלמידים שהורגלו לראות ספקטרום רציף, שמשתרע על כל התחום הנראה, נדרש מעט מאמץ כדי להבחין שמדובר על קטע, שהגוון בו משתנה במידה מועטה בלבד - גון האור הנו סגול.

חלק ב: חקירת אור של מנורת להט בעזרת "תוחם צבעים"

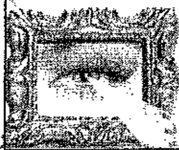
מה דעתך (2)?!

כהרגלנו, ההנחיה למורה בשלב זה היא לא לספק לתלמידים מידע ולאפשר להם לנסח את עמדותיהם. במהלך הפעילות ניתנת להם הזדמנות לברר אם צדקו או לא.
1. התשובה המקובלת - שישה או שבעה צבעים, וזו התשובה שיענו מרבית התלמידים. בסיום הפעילות יגיעו התלמידים למסקנה, שמספר הצבעים הוא אין-סופי, מאחר שמדובר על רצף של אורכי גל (או תדירויות).
2. כנ"ל.
3. חלק ממרכיבי האור הנראה יהיו חסרים (או שעוצמתם היחסית תהיה נמוכה) בספקטרום של מקור אור ירוק.

מהלך הפעילות

בניית "תוחם צבעים"

תוחם הצבעים בנוי מסדרת לוחיות מפלסטיק בצבע חלב וסדרת דפי אלומיניום שמפרידים ביניהן. את לוחיות הפלסטיק ניתן להכין על-ידי ניסור של לוח פלסטיק מהסוג המשמש לחיתוך ירקות. ניתן גם להכין (או לרכוש) לוחיות מפרפין מותך. יש לקפל את דף האלומיניום, כך שצדו המבריק יותר יופנה כלפי חוץ ולדאוג שיכסה **במדויק** את שטח הלוחיות. כמו-כן יש להצמיד לשתי הלוחיות הקיצוניות דפי אלומיניום, כשצדן המבריק יותר פונה ללוחית עצמה. את "כריך" הלוחיות ודפי האלומיניום יש להדק בגומיות. ההמלצה בחוברת היא להשתמש בעשר לוחיות, ניתן להשתמש גם במספר לוחיות שונה (בין 8 ל-12).
מקור האור בפעילות זו צריך להיות נורת להט, שעוצמת התאורה שלה גבוהה ככל האפשר. לאחר שבדקנו כמה אפשרויות (נורת הלוגן, לדוגמה), המקור שאנו ממליצים להשתמש בו הוא מקרן שקופיות.



יתרונות בשימוש בו הם בעיקר:

- הספק המנורה (ולכן עוצמת התאורה) גבוה;
- המנורה נתונה בתוך קופסה שמונעת תאורה מיותרת בסביבה;

קיימת במקרן עדשה שבעזרתה ניתן לשלוט על טיב אלומת האור.

על מנת להשיג תבנית עקיפה טובה בעזרת הסריג, נציב בחלקו הקדמי של המקרן פיסת פלסטיק מחורץ (חריץ מלבני ברוחב 3-2 מ״מ), כך שאלומת האור שתתקבל תהיה צרה. בסעיף ב בחוברת לתלמיד וכן באיור 6 נכתב בטעות שיש להשתמש בפיסת קרטון מחורץ, ההנחיה הנכונה היא זו שכלולה ברשימת הציוד הדרוש לפעילות - פיסת פלסטיק מחורץ. השימוש בפלסטיק עדיף, מכיוון שקל יותר ליצור בו חריץ בעל שוליים חלקים.

בהנחה שלרשות המורה עומד מקרן שקופיות אחד, מומלץ לבצע חלק זה של הפעילות כהדגמה.

״כריך״ הלוחיות ודפי האלומיניום ישמש כ״תוחם צבעים״: כאשר הספקטרום של נורת להט מוקרן עליו, כל לוחית נראית מוארת בגוון **אחיד** לכל רוחבה, שונה מהגוון שבו מוארות הלוחיות הסמוכות לה. במילים אחרות: מתקבלת תבנית צבעונית שמכילה מספר **סופי** של צבעים (כמספר הלוחיות), במקום **רצף** הצבעים שקיים בספקטרום המקורי של נורת הלהט, ספקטרום האור הנראה. (בחוברת לתלמיד ציינו בסעיף ג, שיש לקבוע את המרחק בין תוחם הצבעים לבין המקרן, כך שכל הספקטרום הנראה יוקרן על תוחם הצבעים.)

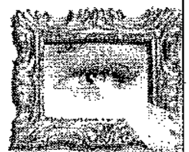
מהו סודו של ״תוחם הצבעים״?

לוחית הפלסטיק (או הפרפין) מפזרת את האור המוקרן עליה. אור זה אינו מונוכרומטי - זהו קטע סופי מתוך הספקטרום הרציף, ולכן בנוי מרצף של אורכי גל. האור המפוזר בתוך הלוחית מגיע גם לדפנותיה, פוגע במשטחי האלומיניום ומוחזר מהם. זו הסיבה שיש להשתמש בצד המבריק יותר של דפי האלומיניום. יוצא שהמרחב שבין שני המשטחים המחזירים לכל רוחבה של הלוחית מואר ב״תערובת״ (סופרפוזיציה) של כל אורכי הגל שכלולים בקטע הנ״ל של הספקטרום. כתוצאה מכך תיראה הלוחית מוארת בגוון מסוים אחיד. לוחיות אחרות ייראו גם כן מוארות בגוונים אחידים, אולם הגוון של כל לוחית יהיה שונה.

מטעמי סימטריה יהיה הגוון של ה״תערובת״ בקירוב אורך הגל הממוצע בקטע ספקטרום זה. ההבדל אם כן בין הגוון שבו תיראה לוחית מסוימת ובין הגוון שבו ייראו הלוחיות הסמוכות לה, תלוי ברוחב הלוחיות ובמספרן (בהנחה שהמקרן ממוקם כך שהספקטרום תופס את מלוא הרוחב של תוחם הצבעים).

ספירת הצבעים בספקטרום בעזרת תוחם הצבעים

הרושם שנוצר בתחילת העבודה עם תוחם הצבעים, כאילו מספר הגוונים שיש בספקטרום זה הנו סופי, עולה בקנה אחד עם התפיסה, שמתבטאת בתשובות של תלמידים רבים על שאלות 1 ו-2 בסעיף ״מה דעתך?״. בעקבות סעיפים א-ג מתברר שמספר הגוונים משתנה בהתאם למיקום תוחם הצבעים. במילים אחרות: הטענה שמספר הגוונים בספקטרום הנו סופי, מעוררת את השאלה מהו המספר? הניסיון שמוצע כאן, למנות את הגוונים בעזרת תוחם הצבעים, נכשל בגלל ההנחה שמספר הגוונים הנו סופי.



המסקנה שמספר הצבעים אינו סופי מקבלת חיזוק נוסף בסעיף ד: גם כאשר לוקחים חלק מהספקטרום, שמכסה רוחב של לוחית אחת ונראה כ״צבע אחד״ כתוצאה מתהליך ה״ערבוב״, ומעבירים קטע זה דרך סריג עקיפה נוסף, מתברר שהוא אינו מונוכרומטי. מכיוון שאפשר לחזור על התהליך הזה מספר פעמים כרצוננו, המסקנה גם הפעם היא שמספר הצבעים בספקטרום אינו סופי.

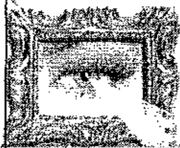
שאלות לדיון מסכם

השאלות בסעיף זה מיועדות ״לסגור מעגל״ ביחס לסעיף ״מה דעתך? (2)״.

הרחבה

בסעיף זה נבדקת הבנת מושג הספקטרום באמצעות סדרת שאלות, שדורשות מהתלמיד ליישם לגבי שפופרות גז קלוש (ספקטרום בדיד) את המסקנות, שאליהן הגיע דרך הפעילות עם נורת להט (ספקטרום רציף).

1. כאשר נחליף את המקרן בשפופרת שהספקטרום שלה בדיד, רק חלק מהלוחיות בתוחם הצבעים ייראו מוארות, בעוד שהלוחיות האחרות לא יוארו.
2. המרכיב הירוק ייראה על הלוחית שבה נראה במהלך הפעילות עם המקרן כמקור האור.
3. כנ״ל לגבי המרכיב הכתום.
4. בהנחה שתוחם הצבעים מוצב בדיוק במקום שמצוין בסעיף ג של שלב בניית תוחם צבעים (כשיואר על-ידי המקרן, הספקטרום הרציף יתפוס את מלוא הרוחב של תוחם הצבעים), מיקומם של הצבעים שכלולים בספקטרום הבדיד יהיה זהה למיקומם של אותם הצבעים, כאשר המקרן היה מקור האור.



פעילות 20: קרינת חום

מה דעתך?

1. הטמפרטורה של חוט הלהט בנורה דולקת של פנס-כיס גבוהה מזו של תנור חימום חשמלי בפעולה; עם זאת קרוב לוודאי שחלק גדול מהתלמידים סבורים אחרת. המורה לא אמור "לתקן" שגיאה זו בשלב הנוכחי.
2. לא כל הכוכבים שאנו רואים בשמים מופיעים באותו צבע: האור של חלק מהכוכבים בשמים הוא בגוון אדמדם, ואורם של האחרים בגוון כחלחל. יש להניח שחלק מהתלמידים לא שמו לב לעובדה זו, במיוחד בהתחשב בכך שמעטים בימינו מתבוננים בשמים בשעות הלילה.
3. מורים ששאלו את תלמידיהם אם לדעתם מרבית העצמים שנראים בשמי הלילה מחזירים את אורה של השמש או מאירים בעצמם, גילו קרוב לוודאי שרובם סבורים שהשמש היא מקור האור היחיד בשמים, ושניתן לראות את "הכוכבים" הודות לעובדה שהם מחזירים את אורה של השמש.

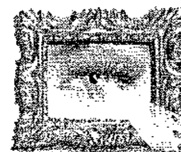
תפיסה זו עולה בקנה אחד עם האמונה, שהטמפרטורה של השמש גבוהה מזו של כל יתר הכוכבים, ויש להניח שכך ישיבו תלמידים רבים על שאלה זו.

4. בחוברת לתלמיד רשום: "כיצד ניתן לקבוע את הטמפרטורה... וכו'"; ניסוח מוצלח יותר של השאלה יכול להיות: "כיצד ניתן לקבוע או להעריך את הטמפרטורה...".

שאלה זו מצביעה על הצורך במדידה עקיפה ומזמנת לתלמידים אפשרות לתת תשובות יצירתיות, אשר נשענות על תופעות פיזיקליות, שבהן נתקלו בחיי היומיום או במהלך הלימוד השיטתי של פרקים בפיזיקה.
נביא כאן כמה דוגמאות לתשובות כאלו:

א. אפשר לשפוך כמות מסוימת של מים על המשטח ולבדוק כמה זמן לוקח להם להתאדות.
ב. אפשר להניח על המשטח מוטות מתכת ולעקוב אחר תהליך ההיתוך שלהם.
ג. לשים לב האם המשטח פולט אור, ואם כן באיזה גוון.
ד. להשוות בין הקצב הרגיל של עליית האוויר לבין הקצב של עליית האוויר מעל המשטח בעזרת פתיל מעשן.
ה. להניח על המשטח מכל גז שהטמפרטורה ההתחלתית שלו ידועה, ולבדוק מהו שינוי לחץ הגז.

בפעילות זו נשתמש ברעיון שמוזכר בדוגמה ג.



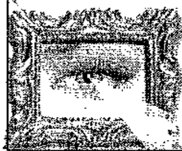
חלק א: בירור הקשר בין צבע הלהבה ובין הספקטרום שלה

מהלך הפעילות

א. שינוי אספקת האוויר ללהבת המבער גורם לשינוי צבע הלהבה: כאשר אספקת האוויר טובה, הלהבה כחולה, ואילו כאשר קצב אספקת האוויר יורד, הלהבה נעשית כתומה.

ב. כאשר בוחנים את האור הנפלט מהלהבה הכחולה בעזרת סריג עקיפה, מתברר כי הספקטרום הנו בדיד. זהו ספקטרום פליטה של מולקולות, שנוצר עקב מעברי אנרגיה פנימיים בתוך המולקולה עצמה.
הספקטרום האופייני לגופים צפופים (ומכונה קרינת גוף שחור, ראה הרחבה פיזיקלית בנושא גוף שחור בהמשך). היות ושהלהבה שקופה, לא מתקיים בה שיווי-משקל בין קרינה לבין חומר, מה שמאפיין גוף שחור - הקרינה שנפלטת על-ידי המולקולות המעוררות "בורחת", או במילים אחרות לא נבלעת בחומר שבסביבת הלהבה. כתוצאה מכך האנרגיה הקינטית של המולקולות איננה גבוהה מספיק כדי לגרום להתנגשויות. אם מתרחשות התנגשויות כאלו, יכולה להיפלט קרינה בעלת ספקטרום רציף עקב האצה של חלקיקים טעונים.
כשמתבוננים דרך סריג עקיפה לעבר הלהבה הכתומה, רואים ספקטרום רציף, שבו העוצמה היחסית של התחום הסגול-כחול נמוכה. תוצאה זו מתחברת לרעיון שכבר הוצג ונדון בפעילות 19 - הקשר בין צבעם של מקורות אור ובין הספקטרום שלהם; כפי שכבר ראינו, העוצמה היחסית של המרכיבים השונים של הספקטרום קובעת את גוון האור.
עובדה זו קשורה בטיב תהליך הבעירה - להבה כתומה מתקבלת כאשר אספקת האוויר ללהבה אינה טובה, והבעירה אינה שלמה. האור הכתום נפלט מחלקיקי הפיח החמים, שנוצרים בתהליך הבעירה. הטמפרטורה של הלהבה הכתומה - בערך 2,000k.

ג. כאשר מקרבים לוח זכוכית אל הלהבה הכתומה, לוח הזכוכית מתכסה בשכבת פיח. זאת משום שחלקיקי הפיח נצמדים ללוח הזכוכית הקר יחסית, מתקררים ויוצרים שכבה שנראית שחורה.



חלק ב: מה הקשר בין צבע להבה ובין הטמפרטורה שלה?

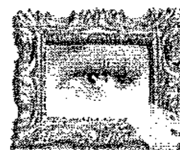
מהלך הפעילות

בחלק זה של הפעילות מחממים כמות ידועה של מים במשך זמן נתון, פעם אחת באמצעות מבער עם להבה כחולה, ופעם שניה באמצעות מבער עם להבה כתומה. מידת ההתחממות של המים מאפשרת לקבוע אם הטמפרטורות של שתי הלהבות שוות, ואם - איזו להבה היא בעלת טמפרטורה גבוהה יותר.

מתברר שהלהבה הכחולה חמה יותר. הדבר נובע, כפי שכבר נאמר בחלק א, מהעובדה שהבעירה אינה שלמה, כאשר קצב אספקת האוויר נמוך, מצב בו מתקבלת להבה כתומה. לעומת זאת כאשר קצב אספקת האוויר מתאים לקצב הזרמת תומר הדלק (הגז שבמכל המבער), תהליך שריפת הגז יעל יותר, ומשתחררת אנרגיית חום בקצב גבוה יותר.

דיון בתוצאות

1. הטמפרטורה של הלהבה הכחולה גבוהה מזו של הלהבה הכתומה.
בהמשך לדיון הקודם חשוב להדגיש כי תהליך פליטת האור מלהבה שצבעה כחול שונה מתהליך פליטת האור מלהבה שצבעה כתום בפליטת האור מלהבה כתומה מעורב חומר צפוף (חלקיקי הפיח). בחלק הבא של הפעילות (חלק ג) יתברר שספקטרום הקרינה שנפלטת על-ידי חומר צפוף (קרינת גוף שחור) תלוי בטמפרטורה, באופן שהעוצמה היחסית של החלק הסגול-כחול של הספקטרום גדלה כאשר הטמפרטורה עולה. מאוחר יותר נראה שהקשר בין הטמפרטורה ובין צבע האור שפולטים גופים צפופים, קובע שערך הטמפרטורה של גוף צפוף שפולט אור כחול, נע בין $6{,}000^0$ ל-$7{,}000^0$.
במקרה שלנו המצב שונה - כאשר הלהבה כחולה, צבע האור אינו נקבע לפי הטמפרטורה, אלא על-ידי מעברים אנרגטיים שמתרחשים במולקולות מעוררות. הלהבה יכולה לשמש דוגמה למקור אור, ששינוי הצבע שלו קשור עם שינוי טמפרטורה, אולם היא אינה יכולה לייצג את הקשר שבין צבע לטמפרטורה של גוף שחור. במילים אחרות: הלהבה הכחולה אמנם חמה יותר מהלהבה הכחולה, אולם הבדלי הטמפרטורה בינן אינם מתאימים לחוקי הקרינה של גוף שחור (ראה הרחבה פיזיקלית).
2. שאלה דומה הוצגה בשלב "מה דעתך?" בתחילת פעילות 20. ייתכן שבעקבות חלקים א ו-ב של הפעילות יציעו חלק מהתלמידים למדוד טמפרטורה של גופים באמצעות הספקטרום שלהם. רמז ראשון לדרך שבה אפשר למדוד טמפרטורה, ניתן בחלק ג.



חלק ג: חקירת ספקטרום של מנורת להט בטמפרטורות שונות

מהלך הפעילות

1. **עבודה באור חזק**

מומלץ לבצע שלב זה כהדגמה בגלל אותם הטעמים, שהזכרנו בהתיחסות לפעילות 19 חלק ב. הנקודה הבעייתית בפעילות זו קשורה ברגישות השונה של חיישני האור לחלקים השונים של הספקטרום. לדוגמה: תגובתם של חיישנים רבים גבוהה יחסית בתחום הצהוב, יורדת בהדרגה לכיוון הכחול ויורדת בתלילות בכיוון ההפוך, בכיוון האדום. לכן בבואנו למדוד את העוצמה היחסית של תחומים שונים בספקטרום, עלינו לדעת מהו גורם הכיול של החיישן בכל אחד מהתחומים הללו. רק אז נוכל לקבל על ידי חילוק של קריאת החיישן בגורם הכיול את עוצמת האור (ראה שלבים ה, ו וטבלה 1 בחוברת התלמיד). מבין החיישנים שבדקנו מצאנו שנות לעבוד עם פוטומטר, שמיוצר על-ידי חברת **PASCO**, מכיוון שמצורף אליו גרף הכיול של החיישן.

התוצאות שהתקבלו באמצעות פוטומטר זה נמצאות בטבלה 1. נעיר כאן שתי הערות לגבי תוצאות אלו:

א. רגישות החיישן התקבלה מתוך גרף כיול שמצורף על-ידי היצרן.

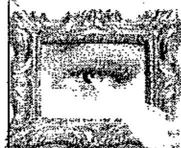
בתחום 7,000 A - 6,500 A הרגישות היחסית של החיישן משתנה בין 0.95 ל-0.05, ולכן מידת האי-דיוק בקביעת גורם הכיול של החיישן גבוהה במיוחד עבור לוחית 8. עובדה זו תילקח בחשבון בשאלה מס׳ 1 בסעיף ״שאלות לדיון מסכם״.

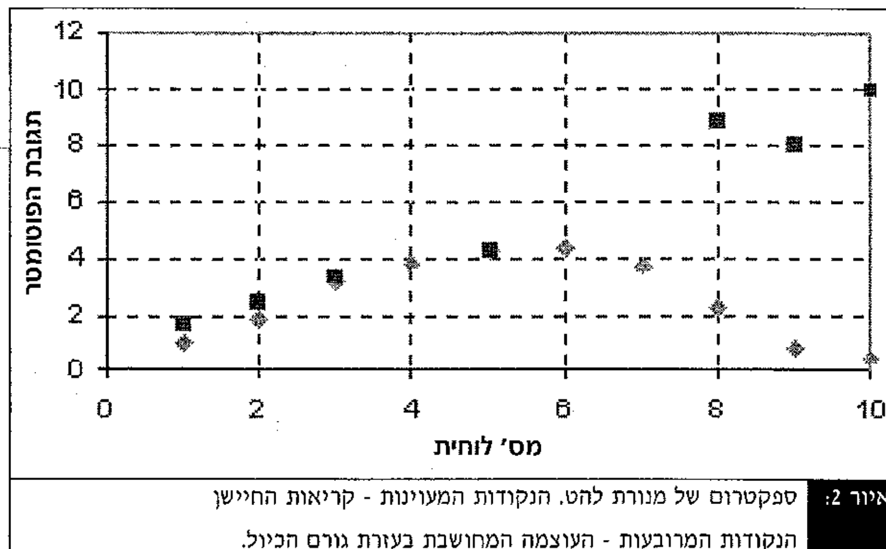
מס׳ לוחית	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
צבע		אדום	כתום	צהוב כתום	צהוב	צהוב ירוק	ירוק	כחול	סגול	
תגובת הפוטומטר	0.5	0.8	2.2	3.7	4.4	4.3	3.8	3.2	1.9	1
גורם הכיול	0.05	0.1	0.25			1	0.95	0.8	0.6	
של החיישן										
עוצמת האור	10	8	8.8			4.3		3.37	2.37	1.66

טבלה 1: תוצאות מדידה של עוצמת האור ביחס של נורת להט שמאירה במלוא העוצמה

ב. בלוחיות 9 ו-10, שנמצאו בשולי התחום הנראה של הספקטרום ונראו מוארות בעוצמה חלשה ביחס ליתר הלוחיות, העוצמה שמתקבלת (לאחר שלוקחים בחשבון את גורם הכיול של החיישן) גבוהה ביותר!

בסעיף ד מתבקש התלמיד לשרטט גרף של תגובת החיישן כתלות במספר הלוחית; לאחר מכן, בסעיף ו, הוא מתבקש לשרטט באותה מערכת צירים את העוצמה המחושבת (בעזרת גורם הכיול).

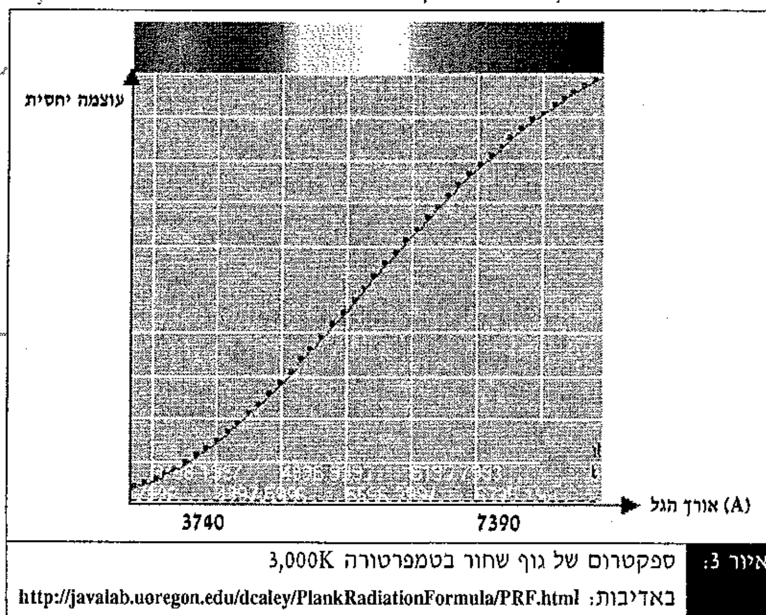




איור 2: ספקטרום של מנורת להט. הנקודות המעוינות - קריאות החיישן
הנקודות המרובעות - העוצמה המחושבת בעזרת גורם הכיול.

באיור 2 ניתן לראות גרפים שהתקבלו בניסוי הנ"ל. בגלל הרגישות השונה של חיישן האור לחלקים השונים של הספקטרום, הגרף הראשון שהתקבל הנו גרף עם מקסימום. הגרף השני, שבו מוצגת ההתפלגות "האמיתית" של העוצמה כתלות בצבע, הוא גרף עולה לכיוון התחום האדום.

בהנחה שהטמפרטורה של מקור האור היא 3,000k בקירוב, חישוב בעזרת חוק Wein מראה שאורך הגל שבו מתקבלת העוצמה המקסימלית הנו 10,000A כלומר בתחום האינפרה אדום. (אל חוק Wein נתייחס בפעילות 22). משמעות הדבר היא שאכן העוצמה עולה לאורך כל התחום הנראה של האור, כפי שמראה הגרף השני, ומגיעה לערך מקסימלי מעבר לתחום הנראה. ניתן לראות זאת גם באיור 3, שבו מוצגת ההתפלגות התאורטית של עוצמת הקרינה הנפלטת מגוף שחור בטמפרטורה של כ-3,000k כתלות באורך הגל.



איור 3: ספקטרום של גוף שחור בטמפרטורה 3,000K
באדיבות: http://javalab.uoregon.edu/dcaley/PlankRadiationFormula/PRF.html



2. **עבודה באור חלש**

א. במקרה שאין עמעם שמותאם למתח 220V, אפשר להחליף את המקרן בנורה של 24V. (בחוברת התלמיד נכתב בטעות 25 ואט). ניתן לחבר נורה זו למקור המתח בחיבור פוטנציומרי, ואז לעמעם אותה במידה הרצויה. חשוב להקפיד שמיקומם היחסי של סריג העקיפה ושל הלוחיות לא ישתנה.

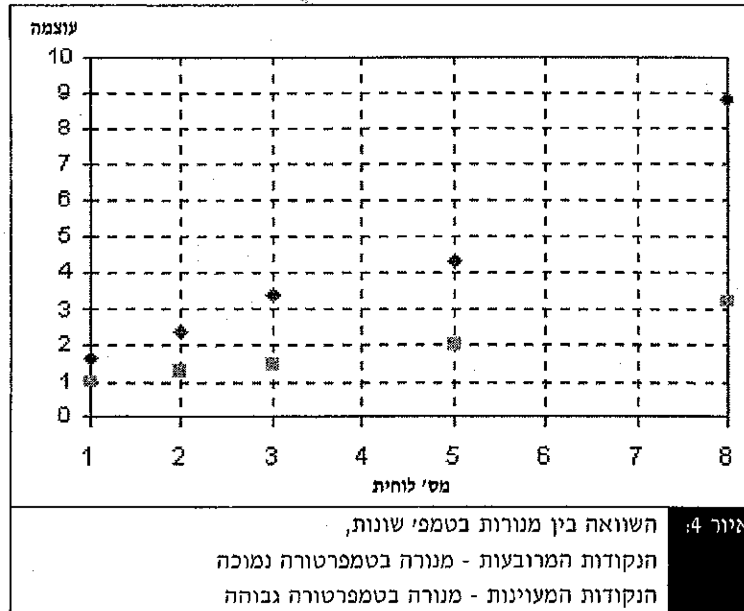
1. כאשר מעמעמים את הנורה לעוצמה מינימלית, צבע חוט הלהט הופך לאדמדם.
2. ההערה שבסוגריים מיותרת.
3. אם מעמעמים את אור הנורה בהדרגה, ניתן לראות שתוך כדי היחלשות עוצמת האור נפסקת התאורה של לוחית מס' 10, ואחריה לוחית מס' 9 וכו'. כשמגיעיםלעוצמה המינימלית, שבה ניתן עדיין להבחין בספקטרום, רק הלוחיות הקרובות לקצה האדום מוארות בעוצמה חלשה מזו שהייתה לפני העמעום.

ב. דוגמה לתוצאות מדידה שהתקבלו מופיעה בטבלה 2. לא ניתן היה לקבל קריאה בשתי הלוחיות הקיצוניות מכיוון האדום - לוחיות 9 ו-10, בגלל הרגישות הנמוכה של החיישן בתחום זה (ראה טבלה 1).

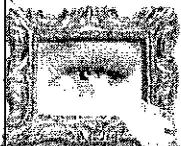
ג. באיור 4 מוצגת התפלגות העוצמה עבור שני המקרים - כאשר טמפרטורת המנורה גבוהה יחסית (נקודות כחולות), וכאשר היא נמוכה (נקודות אדומות). בשתי העקומות ניתן לראות מגמת עלייה של העוצמה היחסית לכיוון האדום, כאשר ערכי העוצמה היחסית של הנורה בעלת הטמפרטורה הגבוהה גדולים יותר.

מס' לוחית	8	7	6	5	4	3	2	1
צבע	אדום	כתום	צהוב	צהוב	צהוב חום	ירוק	כחול ירוק	סגול
רגישות החיישן	0.25			1		0.95	0.8	0.6
תגובת הפוטומטר	0.8	1.6	2	2	1.65	1.4	1	0.6
עוצמת האור	3.2			2		1.47	1.25	1

טבלה 2: תוצאות מדידה של עוצמת האור של נורת להט שמאירה בעוצמה חלשה



איור 4: השוואה בין מנורות בטמפ' שונות,
הנקודות המרובעות - מנורה בטמפרטורה נמוכה
הנקודות המעוינות - מנורה בטמפרטורה גבוהה



שאלות לדיון מסכם

1. את היחס בין עוצמת ההארה באור הכחול ובין עוצמת ההארה באור האדום נחשב בעזרת טבלה 1, עבור הנורה החזקה:

$$\frac{I_{blue}}{I_{red}}=\frac{2.02}{8.8}=0.23$$

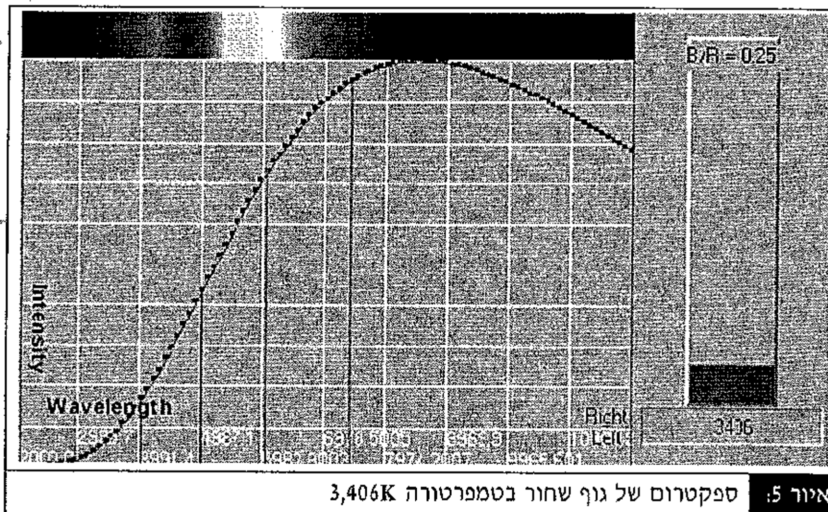
בתור העוצמה בתחום הכחול לקחנו את ממוצע הקריאות של לוחיות 1 ו-2, ובתור העוצמה בתחום האדום לקחנו את הקריאה של לוחית 9, בגלל האי-הדיוק בקביעת גורם הכיול עבור תחילת התחום האדום. (ראה הערה בסעיף "מהלך הפעילות - 1. עבודה באור חזק".)

באיור 5 מוצג הספקטרום של גוף שחור בטמפרטורה **3,400K** בקירוב; העוצמה היחסית בתחום האדום ובתחום הכחול נמדדה בעזרת פילטרים (מסננים), יחסי העוצמה בתחומים אלו **(B / R)** מצוינים על גבי התרשים **B/R**=0.25. התוצאה שהתקבלה בניסוי שתיארנו קרובה לערך זה, מה שמרמז שהטמפרטורה של מקור האור שאתו עבדנו, אכן שווה בקרוב ל-3,000K.

באופן דומה, נחשב יחס זה עבור הנורה החלשה בעזרת טבלה 2:

$$\frac{I_{blue}}{I_{red}}=\frac{1}{3.2}=0.31$$

2. כפי הנראה, רמת האי-דיוק של המדידות במקרה של המנורה החלשה גבוהה. לקראת המהדורה הבאה ייבדקו תוצאות אלו שנית. מתוצאות החישובים שהוצגו בתשובה לשאלה 1, אפשר להגיע למסקנה שגויה, שהיחס בין עוצמת ההארה באור הכחול לבין עוצמת ההארה באור האדום גדל, כאשר הטמפרטורה של מקור האור יורדת. למעשה, קורה בדיוק ההפך. הנתונים המובאים בגרסה זו מיועדים רק להמחיש את אופן עיבוד הנתונים המצופה בפעילות זו.
3. אם נוכל לחמם את המנורה לטמפרטורה גבוהה מזו שאתה עבדנו, העוצמה היחסית של החלק הכחול בספקטרום תעלה, ולכן גוון האור ישתנה לכחלחל-לבנבן.
4. כאשר המרכיב הכחול חסר בספקטרום הפליטה של נורת להט, הגוון הכללי של האור הנו אדמדם.



איור 5: ספקטרום של גוף שחור בטמפרטורה 3,406K

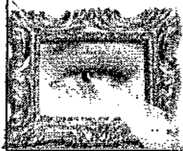
שעורי-בית

1. ככל שטמפרטורת פני הכוכב נמוכה יותר, העוצמה היחסית של המרכיב האדום בספקטרום שלו גדולה יותר, לכן בהשוואה לפרוקיון, ייראה בטלגיוז אדום.
2. התפלגות העוצמה של הצבעים בספקטרום השמש מתאימה לחוקי הקרינה של גוף שחור (ראה הרחבה פיזיקלית בהמשך). לצבעים שונים יש עוצמה יחסית שונה, כאשר העוצמה המכסימלית מתקבלת בתחום הירוק (5,400A). את הערך הזה ניתן לקבל מתוך החוק של **Wein**, כפי שנראה בפעילות 22 שבהמשך.
3. כאשר מחממים ברזל, הוא מתחיל לפלוט אור. כאשר הטמפרטורה שלו משתנה בין 300^0C ל-900^0C בקירוב, עוצמת האור גדלה, וצבעו משתנה מאדום כהה לאדום בהיר. אם ממשיכים לחמם אותו, צבעו הופך צהוב, כאשר הטמפרטורה שלו מגיעה ל-$1,000^0C$. בטמפרטורות שבין $1,250^0C$ ו-$1,600^0C$ (טמפרטורות התכה) צבעו הופך לבן. זהו מקור המונח "ברזל מלובן", שפירושו ברזל שנמצא בשלבי היתוך.

תקשוב

התלמיד מופנה לאתר **http://javalab.uoregon.edu/dcaley/PlankRadiationFormula/PRF.html**. העבודה עם ההדמיה מאפשרת לו ליישם את העיקרון, שאליו רומזת פעילות 20 - הספקטרום של גוף שחור נקבע על-ידי הטמפרטורה שלו, וכתוצאה מכך גם היחס בין עוצמת ההארה בתחום הכחול ובין עוצמת ההארה בתחום האדום. התלמיד מתבקש להשוות בין התוצאות שמתקבלות בתשובה לשאלה 1 מתוך השאלות לדיון המסכם ובין התוצאות שמתקבלות בעבודה עם ההדמיה שנמצאת באתר. הדבר יאפשר לו להעריך את הטמפרטורה של הנורה שאתה עבד בדרך דומה לזו שהצגנו בתשובתנו לשאלה 1.

אם אין גישה לכיתת מחשבים מקושרים לאינטרנט, אפשר לבצע את השלב המתוקשב כשיעורי-בית. במקרה כזה המורה יכול לסכם את השלב הזה במפגש הבא. מומלץ להכין לקראת הסיכום כמה שקפים המבוססים על נתונים וגרפים, שמתקבלים במהלך הפעילות באתר האינטרנט שאליו התלמידים הופנו.



פעילות 22: מדידת טמפרטורה של כוכבים;

חוק Wein

מבוא

בפעילות 20 התלמיד חוקר את הייצוג הגרפי של הקרינה הנפלטת מגופים צפופים, שמכונה קרינת גוף שחור: הוא מכיר את צורת העקומה, מגלה שיש בה נקודת מקסימום (בעיקר בעזרת החלק הממוחשב של הפעילות) ולומד להשוות בין טמפרטורות של נורות בעזרת היחס בין העוצמה היחסית של התחום הכחול והתחום האדום בספקטרום הקרינה הנפלטת מן הנורות.

בפעילות זו מוצגת בפני התלמיד סדרת גרפים, שמייצגים את הספקטרום של גופים בעלי טמפרטורות שונות. בעזרת איסוף נתונים מתוך הגרפים הללו התלמיד יכול לגלות חוק Wein, חוק שמאפשר לקבוע במדויק את הטמפרטורה של גופים צפופים, אם הספקטרום שלהם ידוע, כלומר מאפשר למדוד טמפרטורה מרחוק. לחוק **Wein** ישנו, כמובן, שימוש נרחב באסטרונומיה.

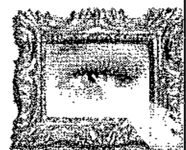
מהלך הפעילות

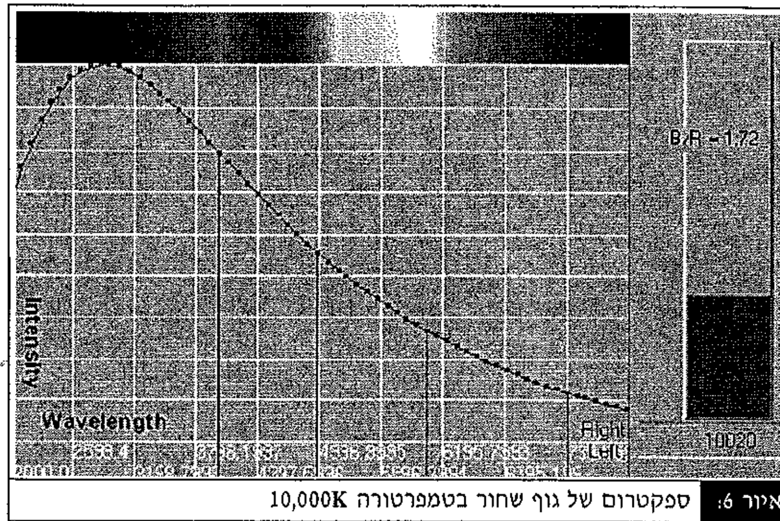
$\lambda_{max\,1} = 4{,}000A,\ \lambda_{max\,2} = 4{,}600A$ בקרוב.

גוון האור שפולט כוכב א נוטה לגוון כחלחל יותר בהשוואה לאור שפולט כוכב ב. הסיבה לכך היא שהעוצמה המקסימלית של האור הנפלט מכוכב א' מתקבלת בתחום הסגול העמוק, ועוצמה זו גדולה בערך פי 2.4 מהעוצמה היחסית של התחום האדום (6,400A). בכוכב ב העוצמה המקסימלית מתקבלת בתחום הכחול, והיא גדולה רק פי 1.4 לערך מהעוצמה היחסית של התחום האדום.

סיכום הפעילות

1. אורך הגל שבו מתקבלת העוצמה המקסימלית בספקטרום של סיריוס הנו בקרוב **3,000A** (ראה איור 6). הטמפרטורה שלו היא **10,000 K**, כפי שניתן לחשב בעזרת חוק **Wein**.
יש להניח שמרבית התלמידים יקבלו ערך נמוך יותר עבור הטמפרטורה - **6,700 K**, וזאת משום שיניחו כי הערך של אורך הגל שבו מתקבלת העוצמה המקסימלית הינו **4,500A** לערך (צבע כחול).
2. אורך הגל של אור צהוב - **5,800A**. אם נציב ערך זה במקום λ_{max} בנוסחה של **Wein**, נקבל שטמפרטורת פני השמש היא **5,170 K**. למעשה, טמפרטורת פני השמש גבוהה יותר - **5,800 K**, ולכן $\lambda_{max} = 5{,}170A$, כלומר בתחום הירוק.





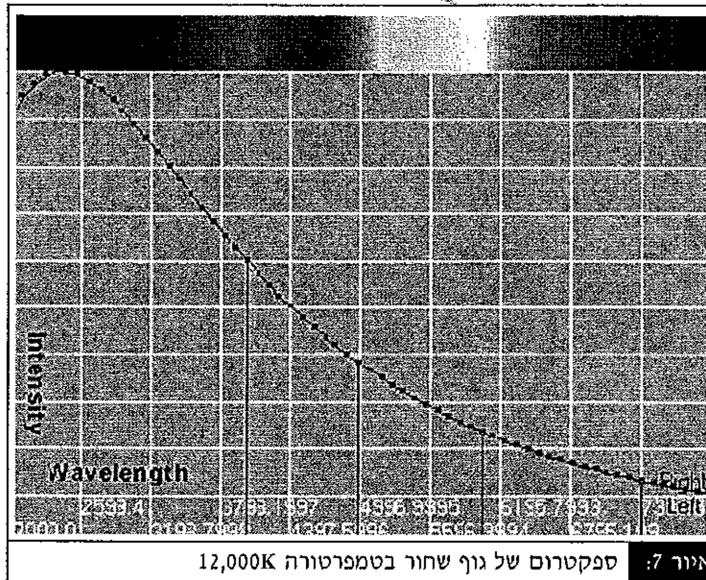
איור 6: ספקטרום של גוף שחור בטמפרטורה 10,000K

3.

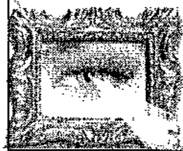
העצם המאיר	הטמפרטורה T(°K)	λ max (m)	הגוון שבו נראה העצם
להבת נר	1,900	1.525×10^{-5}	כתום
נורת טונגסטן 60W	2,800	1.035×10^{-5}	צהוב-כתום
נורת טונגסטן 200W	2,900	9.993×10^{-6}	צהוב
מנורת הלוגן	3,300	8.7818×10^{-6}	לבן-צהבהב

טבלה 3: הטמפרטורה של עצמים מאירים

4. ריגל נראה לבן-כחלחל. טמפרטורת פניו (לפי נתון זה) היא **12,000k**. אנחנו מסוגלים לראות את ריגל, למרות שאורך הגל שבו מתקבלת העוצמה המקסימלית שנפלטת ממנו, נמצא מחוץ לתחום הנראה. מכיוון שהוא פולט כמות אור עצומה גם בתחום הנראה (ראה איור 7). עובדה זו קשורה לחוק אחר של קרינת גוף שחור, שמצביע על הקשר בין טמפרטורת הגוף לבין הספק הקרינה שהגוף פולט.



איור 7: ספקטרום של גוף שחור בטמפרטורה 12,000K



הרחבה פיזיקלית:

עקרונות של מערכות פוטומטריות

מחוק סטפן-בולצמן נובע שהארה של כוכב מסוים L, רדיוס שלו R וטמפרטורה אפקטיבית Tef מקושרים על-ידי הנוסחה:

$$\log\frac{L}{L_{solar}} = 2\log\frac{R}{R_{solar}} + 4\log\frac{T_{ef}}{T_{ef\,solar}}$$

תאוצה של נפילה חופשית על פני הכוכב שווה ל-

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

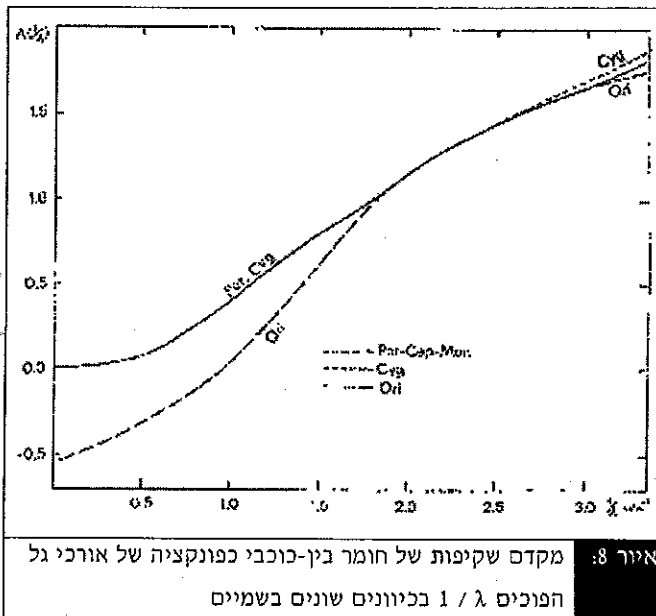
שילוב של שתי הנוסחאות הללו נותן:

$$\log\frac{L}{L_{solar}} = \log\frac{M}{M_{solar}} - \log\frac{g}{g_{solar}} + \frac{Tef}{T_{ef\,solar}} \qquad (1)$$

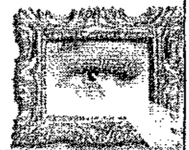
במהלך התפתחות הכוכב מסתו כמעט אינה משתנה, כך שהתקדמות של הכוכב בדיאגרמה המתארת את התלות בין היחס Log (L / Lsol) לבין Log (Tef) (המכונה דיאגרמת HR תאורטית) נגרמת על-ידי שינוי של L, g ו-T, כך שנוסחה (1) תמיד נשארת בתוקף.

גורם נוסף שמשפיע על מיקום של כוכב על דיאגרמת HR, הוא הרכב כימי - עושר של He ,H ויסודות כבדים יותר. לדוגמה, לכוכבי סדרה ראשית בעלי אותה המסה, אך הרכב כימי שונה, שקיפות החומר תהיה שונה, וזאת אומרת שגם רדיוסים ואז גם ערכים של g יהיו שונים.

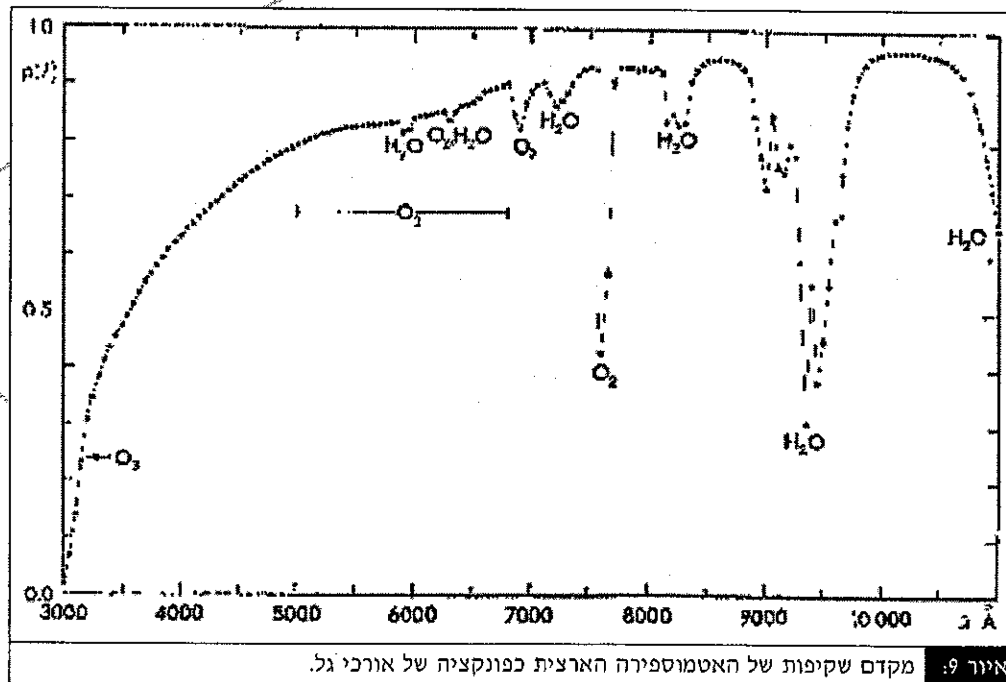
דבר נוסף שמשפיע על קרינת הכוכב ומיקומו על דיאגרמת HR היא סיבוב עצמי של הכוכב. כתוצאה מהסיבוב כוכב מפסיק להיות כדורי והופך לאליפסה. במצב כזה קטבים קרובים יותר למרכז הכוכב מאשר נקודות הנמצאות על קו-המשווה, ולכן גם חמים יותר. כתוצאה מכך בהירות הכוכב תהיה פונקציה של מהירות הסיבוב וזווית בין קו הראייה לבין ציר הסיבוב של הכוכב.



איור 8: מקדם שקיפות של חומר בין-כוכבי כפונקציה של אורכי גל הפוכים λ / 1 בכיוונים שונים בשמיים



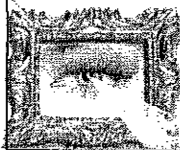
כמובן, על קרינת כוכב משפיעים עוד אין-סוף גורמים, כגון: תנועות גלובליות באטמוספרת הכוכב, שדה מגנטי, כתמים על פני כוכב, פעימות, תופעות גאות ושפל במערכות זוגיות, מעטפת חיצונית, ספיחת חומר, רוח כוכבי וכו׳. לא רק מאפיינים של כוכב או של מערכת זוגית משפיעים על קרינת הכוכב, גם חומר בין-כוכבי שדרכו הקרינה עוברת משנה אותה, והשינוי נעשה משמעותי יותר ככל שהכוכב מרוחק יותר. כמו שניתן לראות מאיור 8, שקיפות החומר הזה תלויה באורך גל, ומה שעוד יותר חמור- היא שונה בכיוונים שונים (כיוון שכנראה, במקומות שונים גם חומר שונה).



איור 9: מקדם שקיפות של האטמוספירה הארצית כפונקציה של אורכי גל.

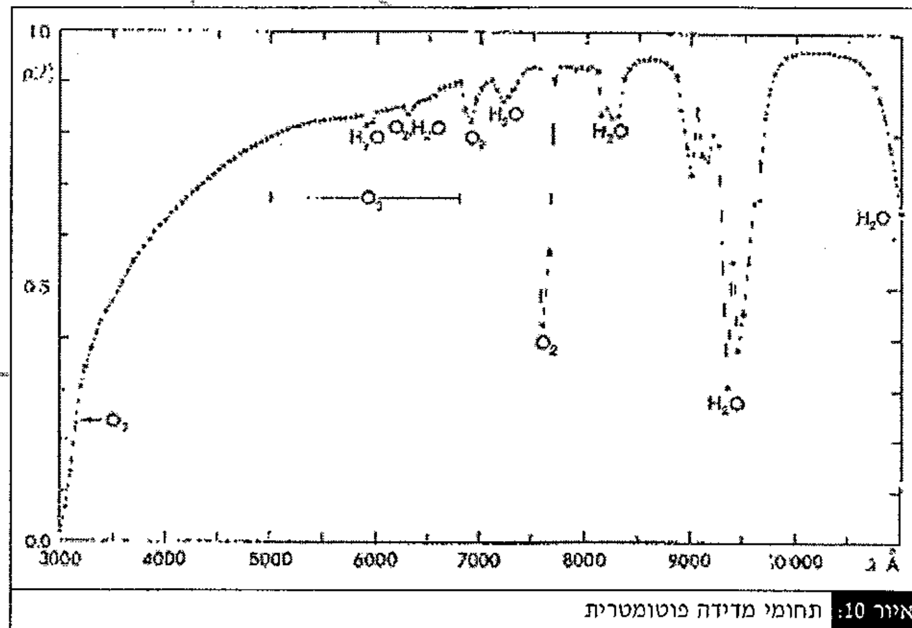
לפני שקרינת הכוכב מגיעה לטלסקופ, היא עוברת דרך האטמוספרה הארצית, ששקיפותה מסובכת (ראה איור 9) ומשתנה במהלך התצפית. כך שלא רק החלל הגדול, אלא גם כדה״א מוסיף לאור של כוכבים חלק משלו. בסופו של דבר, התפלגות אנרגיה בספקטרום של כוכב תלויה לא רק בטמפרטורת הכוכב, אלא גם בגורמים נוספים רבים. על מנת לקבל מידע על מה שמתרחש בכוכב, עלינו להפריד בין הגורמים. הדרך הפשוטה ביותר - לצלם ולחקור את ספקטרום הכוכב. לצערנו, מחקר כזה דורש טלסקופים גדולים, שקוטרם לא פחות מ-2 מטרים. דרך אחרת - לחקור התפלגות אנרגיה בספקטרום של כוכב בצורה גסה יותר - באמצעות מסננים, המעבירים אור רק בתוך ״חלונות ספקטרליים״ מסוימים. שיטה כזאת נקראת ״מחקר פוטומטרי״. כמובן, מיקום החלונות צריך לאפשר הפרדה מקסימלית בין גורמים שונים המשפיעים על קרינת הכוכב.

המערכת הפוטומטרית הראשונה נוצרה בתחילת המאה ה-20 והייתה מבוססת על שוני ברגישויות לאור בין סרט הצילום לבין עין אדם. כידוע, העין רגישה יותר בתחום ירוק (״פילטר ירוק״), בעוד שסרט הצילום רגיש ביותר בתחום כחול (״פילטר כחול״). אם נמדוד גודל נראה של כוכב מסוים פעם אחת באמצעות העין $\mathbf{m}_{visual}$ ופעם שנייה עם סרט צילום $\mathbf{m}_{phot}$, על-פי השוואה בין שתי המדידות נוכל לדעת (בצורה גסה) את צבע הכוכב ואת הטמפרטורה על פניו. ההפרש $\mathbf{m}_{ph} - \mathbf{m}_{v}$ מאפיין צבע של כוכב ונקרא אינדקס-צבע (color-index). המערכת הזאת בשם מערכת בינלאומית



Ipg, אושרה בכנס הראשון של האגודה האסטרונומית הבינלאומית (International Astronomical Union) ב-1922. מאז היו ניסיונות רבים להתאים מערכת IPg או ליצור מערכת חדשה המתאימה לחיישנים אלקטרוניים חדשניים, כמו מכפילור אור, microchannel tube, מצלמת CCD. ב-1950 פרסם Harold Johnson תוצאות ראשונות של מדידות פוטומטריות עם מערכת חדשה Ultra Blue Visual.

מסנני המערכת היו: U: פילטר Corning 9683, B: פילטרים + Schott GG 13, Corning 5030 ו-V: Corning 3384. את עקומות הפילטרים ניתן לראות באיור 10.



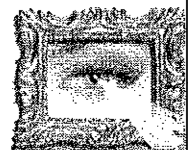
איור 10: תחומי מדידה פוטומטרית

ב- 1953 פרסמו Johnson ו-Harris פרסמו רשימה של 108 כוכבים תקניים. עבור הכוכבים הללו הם מודדו בדייקנות גודל נראה ב"חלונות" UBV. מאז נעשתה המערכת הפוטומטרית של Johnson השימושית ביותר בין המערכות האחרות. איור 4 ממחיש כיצד מערכת UBV מאפשרת להפריד בין כוכבים-ננסים לבין כוכבים-ענקיים וגם רמת אי-ודאות. על מנת לדייק יותר ולקבל מידע נוסף על כוכבים משתמשים היום במערכת UBV מורחבת עם "חלונות" נוספים: UBVRIJKLMNQ המכסה תחום ספקטרלי מ-3,000Å ועד 200,000Å.

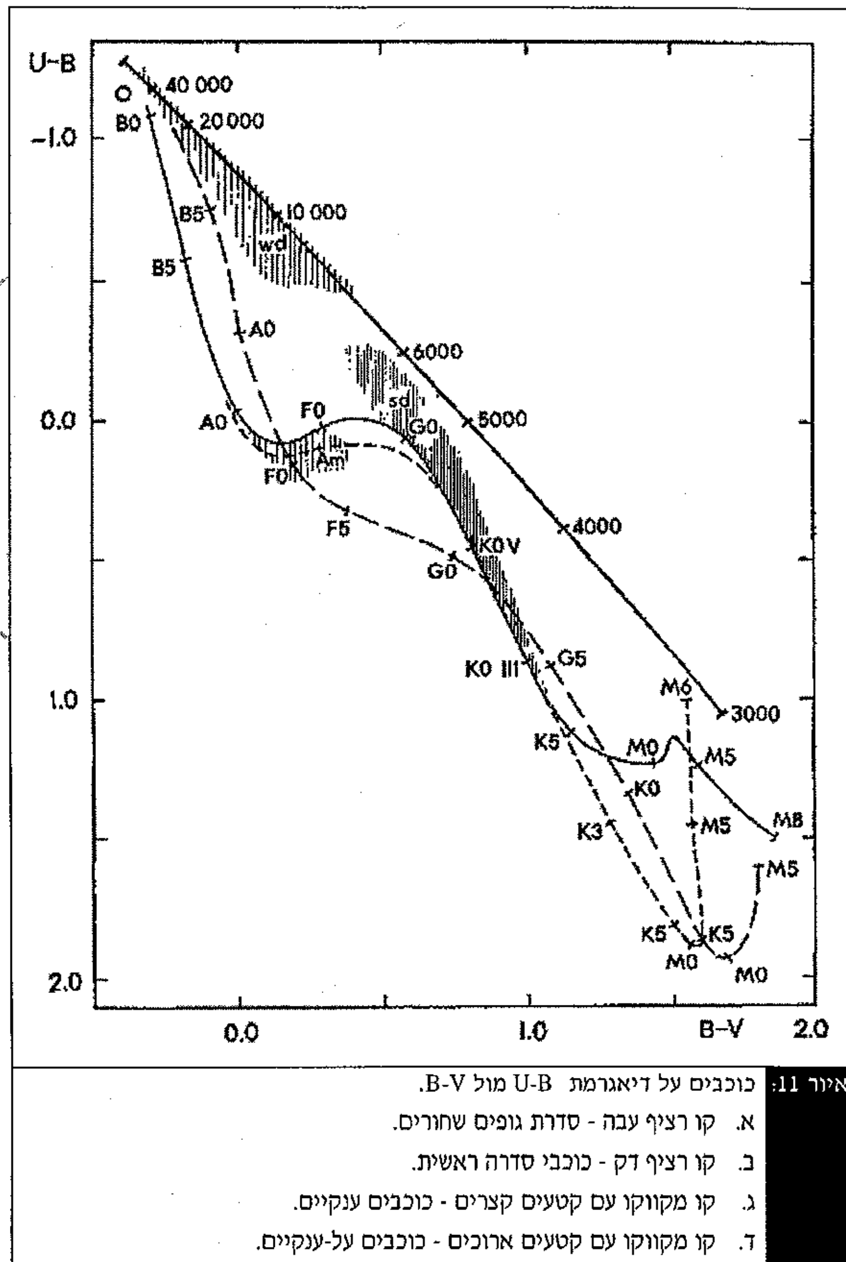
מערכת שימושית נוספת כיום היא מערכת Stromgren u,v,b,y. רוחב החלונות במערכת זו קטן יותר מאשר ב-UBV, כפי שניתן לראות בטבלה 4.

ערך	u	v	b	y
λ, A_0	3,500	4,110	4,670	5,470
Δ λ, A	300	190	180	230

טבלה 4: אורכי גל ממוצעים ורוחב חלונות במערכת פוטומטרית של Stromgren



באופן כללי, ככל שרוחב החלונות של מערכת צר יותר, יכולת ההפרדה שלה בין סוגים שונים של כוכבים גבוהה יותר. אך מצד שני פילטרים כאלה מעבירים פחות אור, ואז דרוש טלסקופ גדול יותר...



איור 11: כוכבים על דיאגרמת U-B מול B-V.

א. קו רציף עבה - סדרת גופים שחורים.

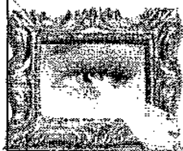
ב. קו רציף דק - כוכבי סדרה ראשית.

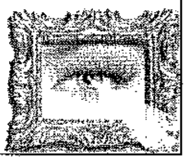
ג. קו מקווקו עם קטעים קצרים - כוכבים ענקיים.

ד. קו מקווקו עם קטעים ארוכים - כוכבים על-ענקיים.

SD - תת-ננסים **(Sub Dwarfs)**

WD - ננסים לבנים **(White Dwarfs)**





חום וצבע

שלמי תודה

במהלך הכנת ועריכת הספר נעזרנו רבות ברשת האינטרנט כמקור מידע נרחב באסטרונומיה. ניתן להתייחס לרשת האינטרנט כספריה ענקית המציעה מידע בכל נושא. אנו מודים לאתרים המופיעים ברשימה זו, על התרומה הרחבה ועיבוד הידע, ועל הסכמתם לשימוש בתמונות שנלקחו מאתרים אלה. ניתן להוריד את הקובץ מאתר פרחי מדע, כך שבלחיצת עכבר ניתן להגיע לכל אחד מהם.

רשימת אתרים מומלצים

1. http://www.yarden.ac.il/blossoms.htm - אתר הבית של "פרחי-מדע" כאן תוכלו לסייר בבית-הספר לאסטרונומיה באינטרנט, להזמין הרצאות וימי שדה ועוד. מתאים למורים וחובבים כאחד.
2. http://hplyot.obspm.fr/np/nineplanets/nineplanets.html - אתר המוקדש למערכת השמש כוכבי הלכת, האסטרואידים, שביטים ושאר העצמים המצויים בה. מתאים לכולם.
3. http://www.solarviews.com/homepage.htm - אתר המכיל מידע רב על מערכת השמש, חקר המערכת במהלך ההסטוריה, ומחקרים עדכניים אודותיה. מתאים לחובבים, מורים ותלמידים.
4. http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/dictionary.html - מילון מונחים באסטרונומיה של Imagin מבית נאס"א. מתאים גם לילדים.
5. Imagin The Universe: http://imagine.gsfc.nasa.gov/index.html - מושגים בסיסיים באסטרונומיה. מומלץ מאד למי שמתעניין באסטרונומיה ורוצה ללמוד מההתחלה בצורה מסודרת.
6. http://www.bc.cc.ca.us/programs/sea/astronomy/book.htm - ספר ללימוד אסטרונומיה אלמנטרית, פועלת כספר אלקטרוני בו תוכלו לעיין בתחום המעניין אתכם. דרוש מעט ידע קודם על מנת להפיק את המיטב.
7. http://learn.ivv.nasa.gov/education/topics.html - טכנולוגיות הוראה של נאס"א מכיל מידע בנושאי אוירונאוטיקה, חקלאות, חינוך, מדעי כד"א, אינטרנט, מוזיאונים, רובוטיקה, אסטרונומיה ועוד. מומלץ למורי אסטרונומיה.
8. http://www.windows.umich.edu - חלון אל החלל, אוניברסיטת מישיגן. מידע על מערכת השמש בצורה מובנית, תוך ציון הרמה לה מיועד החומר. מתאים גם לחסרי ידע קודם.



9. http://liftoff.msfc.nasa.gov - המראה אל חקר החלל - כיצד חוקרים את החלל? סיפורי מחקרים מכל רחבי נאס"א טילים, תחנת החלל, לוויינים, מסעות של אנשים, מושגים בסיסיים במחקר החלל ואפשר גם לעקוב אחר לוונים וחלליות מכאן.

10. http://www.bc.cc.ca.us/programs/sea/astronomy/evolutn/evolutna.htm - גם לכוכבים יש מחזור חיים כמו לבעלי חיים. הם נולדים, חיים ומתים. מה בעצם קורה להם מסופר כאן - חייהם ומותם של כוכבים. מתאים למורי אסטרונומיה וחובבים כאחד.

11. http://www.jpl.nasa.gov/basics/bsfbib.htm - סיורים מעניינים בחלל ברחבי רשת האינטרנט. נקודת מוצא מומלצת.

12. http://spacescience.nasa.gov/osshome.htm - המשרד למדעי החלל של נאס"א. כאן תוכלו למצוא מידע על מבנה והתפתחות היקום, חקר מערכת השמש והקשר בין כדור-הארץ לשמש. מומלץ למורי אסטרונומיה ולבעלי ידע קודם.

13. http://aries.phys.yorku.ca/wiegert - קרוטין, האסטרואיד המלווה את כדור-הארץ, מיהו, מהו, והאם יש סיכוי שיתנגש בכדור-הארץ? מתאים למורים ותלמידים.

14. http://space.jpl.nasa.gov - סימולטור למערכת השמש. אילו גופים של מערכת השמש נוכל לראות הלילה? בעוד שבוע? בעוד 20 שנה... תוכלו לגלות כאן.

15. http://www.unisi.it/fisica/luciana/starsimu/homepage.htm - סימולטור למבנה כוכבים, איך הכוכבים נראים מבפנים? ממה מורכבים? אילו תהליכים מרחשים בהם. דורש ידע מוקדם.

16. http://planetary.org - האגודה האסטרונומית של ארה"ב. האתר מכיל מידע רב על מחקרים בתחומי מערכת השמש כולל מחקרים עדכניים.

17. http://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/StarChild.html - מרכז לימוד לאסטרונום הצעיר למורה שלו ולהוריו. מומלץ כנקודת התחלה פשוטה ובהירת שפה.

18. http://super.colorado.edu/~astr1120/hypertext.html - הכל על כוכבים וגלקסיות, מבניהם, תכונות ועוד. מכיל מידע על איור וקרינה, השמש, כוכבים, הולדת והתפתחות כוכבים, מותם חורים שחורים וכוכבי נויטרונים, היווצרות היקום ועתידו וכן אמצעי ודרכי מחקר ופרק מיוחד על טלסקופים.

19. http://csep10.phys.utk.edu/astr162/index.html - קורס באסטרונומיה המועבר על רשת האינטרנט באוניברסיטת טנסי. הקורס מיועד לסטודנטים הלומדים שם אבל גם אנחנו יכולים להפיק מזה רווח נאה. מיועד בעיקר למורים.

20. http://www.space.com/scienceastronomy/astronomy/index.html - ה-cnn של האסטרונומים. מה חדש, מה קרה ומה עלול עוד לקרות. מיועד לבעלי רמה גבוהה יחסית של ידע באסטרונומיה.



21. http://library.thinkquest.org/12659/main.html - מסע מרתק במערכת השמש ובחלל. יש כאן חלק אינטראקטיבי, פרקים למערכת השמש, החלל החיצון וחקר החלל. מתאים למורים ותלמידים.

22. http://www.as.wvu.edu/~planet/lnk_char.htm - טבלאות מידע באסטרונומיה און-ליין, מפות כוכבים מעודכנות לכל חודש.

23. http://www.as.wvu.edu/~planet/links.htm - "קישורים יוצאים מגדר הרגיל" זה השם וזו המהות. קישורים לאסטרונומיה כללית, קישורים למורים, פיסיקה כללית, אסטרופיסיקה, מערכת השמש, מאדים, חיים מחוץ לכדו"א, החלל החיצון, צילום שמיים וכוכבים, פינת ילדים ונוער, אסטרונומיה לחובבים, איך לקנות טלסקופ, מאדים בתלת-מימד... מתאים לכו-ו-ו-ו-לם.

24. http://www.kheper.auz.com/cosmos/cosmos.htm - החלל-מידע בפיסיקה, אסטרונומיה, קצת היסטוריה ובעיקר מעניין. מתאים למורים ולחובבים.

25. http://encke.jpl.nasa.gov - שביטים מעניינים אותך? התחל כאן. מהם שביטים, מנין באים, אילו שביטים ניתן לראות כיום ועוד. לחובבים שביטים ומתעניינים נוספים.

26. http://geow.com/elso - ספקטרוסקופיה היא כלי מחקר ראשון במעלה. למחפשים תמונות המובאות באורכי גל שונים? איך רואים את השמש באינפרא-אדום תמצאו כאן. מיועד לבעלי ידע קודם.

27. http://www.acs.ucalgary.ca/~schramm/biogrs.html והדרת פני מדען - מדענים שתרמו ידע אסטרונומי ופיסיקלי לאנושות. מתאים למורים ותלמידים ושאר מתעניינים.

28. http://gepasi.dbs.aber.ac.uk/roy/ftir/scatter.htm#rayleigh - פיזור ריילי אחראי לצבע הכחול של השמים. מהי התופעה? כיצד נגרמת? האם רק בשמים? האתר מסביר את התופעה בצורה בהירה ומיועד גם לבעלי ידע בסיסי בפיסיקה.

29. http://www.eecs.umich.edu/mathscience/funexperiments/agesubject/lessons/newton/sky.html - שמיים כחולים. מה גורם לתופעה ועל אילו עקרונות פיסיקליים התופעה מתבססת? תוכלו לקרוא כאן בתוספת הצעות לדיון, קריאה נוספת והצעות לניסויים.

30. http://www.acmi.canoe.ca/CNEWSSpace0002/10_universe.html - אתר המכיל מידע על מדע בכלל. האתר מסודר לפי נושאים וכולל גם מעין פרק חדשות בנושאים אילו. מתאים למתעניינים בעלי ידע קודם.

31. http://liftoff.msfc.nasa.gov/academy/space/atmosphere.html - אטמוספירת כדור-הארץ הרכב, מבנה, תופעות. מתאים למורים ותלמידים.

32. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/blue_sky.html - מדוע השמים כחולים? מדוע השקיעות אדומות? מהו ירח כחול? מדוע השמים על מאדים אדומים? ועוד. שאלות ותשובות על ופעות אטמוספריות. מתאים למורים ותלמידים.



33. http://www2.iol.co.il/hayadan - הידען: אתר בעברית בנושאי אסטרונומיה. מידע וחדשות בנושאי אסטרונומיה.

34. http://www.cosmos.co.il - קוסמוס: חנות לאסטרונומיה בישראל.

35. http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/Things/telescope.html - סקירה של התפתחות הטלסקופ, כולל התייחסות לאישים שקשורים לנושא, לסוגי טלסקופים, כולל תמונות. למורים ולמתעניינים בנושא.

36. http://webphysics.davidson.edu/Applets/java11_Archive.html - הדמיה מצוינת באופטיקה גיאומטרית, שמאפשרת בנית מערכות אופטיות מורכבות (בקישור introduction); מומלץ לבדוק בעיות 3 ו-8. מתאים למורים ולתלמידים.

37. http://wind.cc.whecn.edu/~marquard/astronomy/telescop.htm - סקירה של עקרונות הפעולה של טלסקופ, טלסקופים מודרניים, CCD ותמונות. למתעניינים בנושא, דרוש ידע קודם.

38. http://ulysses.jpl.nasa.gov/mission/rgp/solsys2.html - מודל תלת-מימדי של מערכת השמש. מתאים למורים ולתלמידים.

39. http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncgi/Solar - מודל של מערכת השמש, ניתן לקבלו בקנה מידה אמיתי או לוגריתמי. נותן מידע על מבנה המערכת וסדרי הגודל בה. מתאים למורים ולתלמידים.

40. http://www.bradley.edu/las/phy/solar_system.html - מאגר מידע ענק בנושא מערכת השמש. מכיל מידע על הגופים השונים במערכת. מתאים למורים ולתלמידים.

41. http://msgc.engin.umich.edu/sparc - מאגר מידע ענק בנושאי מערכת השמש וכדור-הארץ שכולל תמונות, סרטים, אנימציות, נתונים. מתאים למורים ותלמידים.

42. http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/radiation.html - אנימציה של מופעי הירח, שמאפשרת לצפות בתופעה במבט-על או מנקודת מבט של כדור הארץ. ניתן להוריד קובץ: Source: MoonPhase.java.

43. http://www.astro.wisc.edu/~dolan/java/MoonPhase.html - אתר המכיל תכנה שמייצרת אנימציה של מופעי הירח.

44. http://www.astro.umass.edu/~arny/quiz/images/moon_phase.mov - סדרת אנימציות והסברים לגבי מופעי הירח.

45. http://www.calvin.edu/~lmolnar/moon - אתר שמאפשר לקבל תמונה של מופע הירח ממקומות שונים בעולם, במרווחי זמן של 4 שעות , בכל תאריך בין 1800-2199. יש בו אנימציה מסוג gif של מופעי הירח שניתנת לשמירה בדיסק מקומי.



46. http://tycho.usno.navy.mil/vphase.html - קובץ ZIP ניתן להורדה של MoonCalc תוכנת DOS (!) שמכילה מידע רב (כולל גרפי): מיקום, גיל ומופע הירח עבור כל זמן ומיקום נתון ע״פ כדור הארץ, וכן אוריאנטציה (כיוון הקו המפריד בין החלק המואר והחלק החשוך של הירח ביחס לאופק), מפות שמראות באילו אזורים של כדה״א נראה הירח במולדו, ועוד.

47. http://www.starlight.demon.co.uk/mooncalc/ - הורדה של תוכנת שמחשבת את מופע הירח ומציגה תמונה דינמית של המופע.

48. http://www.astro.umass.edu/~arny/quiz/earth2.html - שאלון שכולל אנימציה של תנועת כדור הארץ מסביב לשמש. השאלון עצמו ברמה גבוהה יחסית, עוסק בכדור-הארץ ובהחלט דורש ידע. האנימציה מתאימה לכולם ומסבירה יפה את התנועה.

49. http://www.astro.uva.nl/demo/sun/kaft.htm - מאגר אנימציות, סרטונים והסברים לגבי: תהליך המיזוג, סיבוב השמש סביב צירה, כתמי שמש, זרמי קונבקציה והגרנולציה של השמש, ליקויים, התפרצויות על פני השמש, רוח השמש, ועתידה של השמש. דורש ידע מוקדם.

50. http://windows.ivv.nasa.gov/cgi-bin/tour_def?link=/sun/sun.html&cdp=/windows3.html&cd=false&frp=/windows3.html&fr=f&sw=false&edu=mid - מאגר העוסק בשמש. ניתן לקבל מידע חזותי ומילולי רב, כולל סקירה של מחקרים שמתבצעים כיום. באתר משחקים בשלוש רמות; לאתר תפריט דומה לכל אחד מהעצמים האחרים במערכת השמש.

51. http://www.astro.umass.edu/~arny/quiz/images/fusion.mov - סרטון המתאר את יצירת האנרגיה בשמש.





שלמי תורה ורשימת אתרים מומלצים

ביבליוגרפיה

בר ג. (1970). השמש. **מדע ט"ו** עמ' 89-96.

בר-נון ע. (1975). **מסע בעולמות רחוקים**.

גלר צבי (1987). **פרקים באסטרופיזיקה**. הוצאת מכון ויצמן למדע.

גיאסטרו ר. (1991) **מסע אל הכוכבים**. ספרית מעריב.

גל-מן, מ. (1995). **הקווארק והיגואר**. ספריית מעריב, תל-אביב.

גריבין, ג. (1993). **בחיפוש אחרי גבולות הזמן**. כתר, ירושלים.

דגני-רז אירית ונורית שניר (1993). **בעקבות השמש - טכנולוגיות לחקר היקום**. הוצאת רמות אוניברסיטת ת"א.

דייסון, פ. (1992). **אינסופי לכל עבר**. דביר, תל-אביב.

הוקינג ס. (1991). **קיצור תולדות הזמן**. הוצאת מעריב.

ליבוביץ א. (1999). **מקצה השמים - מבוא לאסטרונומיה**. האוניברסיטה הפתוחה.

מידב מ. ברוש נ. נצר ח. (1987). **היקום - יסודות האסטרופיסיקה**. הוצאת רמות - תל-אביב.

סמוט, ג'. דייוידסון, ק. (1995). **קמטים בזמן**. ספריית מעריב תל-אביב.

פייגלס, ה. (1991). **הצופן הקוסמי**. עם-עובד, תל-אביב.

פיינמן, פ. ר. (1998). **התיאוריה המוזרה של אור וחומר**. הקיבוץ המאוחד תל-אביב.

פריס (1993). **מילדות לבגרות בשביל החלב**. ספרית מעריב.

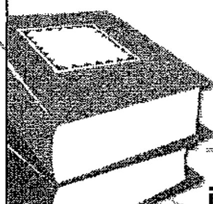
קאקו, מ. (1998). **על מרחב**. ספריית מעריב, תל-אביב.

קופר ה. הנבסט נ. (1993). **האטלס הגדול של החלל**. הוצאת דניאלה די-נור, עם-עובד.

רונאן א. ק. (1993). **תולדות היקום**. הוצאת דניאלה די-נור, ידיעות אחרונות, ספרי חמד.

שביב גיורא (1983). **קוסמולוגיה**. האוניברסיטה המשודרת.

שדה דרור (1985). **חורים שחורים וננסים לבנים**. האוניברסיטה המשודרת.



Audouze J. Israel G. (1994), **The Cambridge atlas of astronomy**, Cambridge University Press, Cambridge.

Aveni A. (1997), **Stairways to the stars**, Wiley.

Barrow J. D. (1997), **The Origin of the Universe**, Basic, NY.

Birney D. S. (1991), **Observational astronomy**, Cambridge Univ. Press, NY.

Bone N. (1993), **Meteors, Sky & telescope.**

Bruck M. T. (1990), **Exercises in practical astronomy using photographs**, Adam Hilger, NY.

Carroll B. W. & Ostlie D. A. (1996) **An Introduction to Modern Astrophysics**, Addison-Welsley Publishing Company, Inc.

Chaisson E. & McMillan S. (1993) **Astronomy Today**, Prentice-Hall Inc.

Chaisson E. (1997), **Astronomy**, Prentice-Hall, Upper Saddle River.

Chandrasekhar S. (1967), **An introduction to the study of stellar structure**, Dover, NY.

Coyle, H. P. (1993), **Project Star: The Universe In Your Hands**, Kendall/Hunt Publishing Company, IowaChaisson E. (1993), **Astronomy today**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Culver R. (1984), **An introduction to experimental astronomy**, Freeman.

Ferris T. ed. (1991), **The world treasury of physics, astronomy, and mathematics**, Little, Brown, Boston.

Franknoi A. (1997), **Voyages through the universe**, Saunders College Publishing, Fort Worth.

Franknoi A. (1995), **The universe at your fingertips**, Astronomical Society of Pacific.

Fix, J. D. (1999), **Astronomy: Journey To The Cosmic Frontier**, WCB McGraw-Hill

Gibilisco S. (1985), **Comets, meteors and asteroids.**

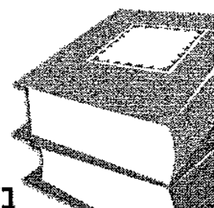
Greeley R. (1997), **The NASA atlas of the solar system**, Cambridge UP, Cambridge ENG.

Gribbin J. (1997), **Companion to the cosmos**, Little Brown, Boston, MS.

Hansen C. J. (1994), **Stellar interiors, Springer-Verlag**, NY.

Hathaway N. (1994), **The friendly guide to the universe**, Penguin Books, NY.

Henbest N. (1994), **Guide to the galaxy**, Cambridge University Press, NY.



Henden A. (1990), **Astronomical photometry**, Willmann-Bell, Richmond, Virginia

Hoskin M. (1997), **Cambridge illustrated history of astronomy**, Cambridge UP, NY.

Kaler J. B. (1989) **Stars and their Spectra**, Cambridge University Press

Kippenhahn R. & Weigert A. (1994), **Stellar Structure and Evolution**, Springer - Verlag Berlin Heidelberg.

Lang K. R. (1995), **Sun, earth and sky**, Springer, Germany.

Levy D. H. (1989), **Observing variable stars**, Cambridge University Press, NY.

Lipson S. G, H. Lipson, D. S. Tannhauser, (1995), **Optical Physics - third edition**, Cambridge University Press.

Martinez P. (1994), **The observer's guide to astronomy**, Cambridge University Press, NY.

Minnart M. (1954) **The nature of Light & Color in the open air**: (ISBN 486-20196-1), Dover Publication Inc.

Montenbruck O. (1994), **Astronomy on the personal computer**, Springer-Verlag, NY.

Morrison D, (1996), **The planetary system, Addison-Wesley**, Reading MA.

North J. (1995), **The Norton history of astronomy and cosmology (series)**, Norton, NY.

Pannekoek A. (1961), **A history of astronomy**, Dover, NY

Pasachoff J. M. (1992), **A field guide to the stars and planets**, Houghton Mifflin, Boston.

Petersen C. C. (1996), **Hubble vision**, Cambridge UP, NY.

Phillips K. J. H. (1992), **Guide To The Sun**, Cambridge University Press.

Raymo C. (1982), **365 starry nights**, Simon & Schuster, NY.

Rey, H. A. (1980), **The stars**, Houghton Mifflin, Boston.

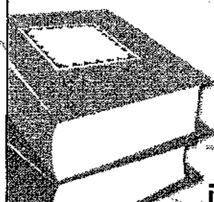
Ridpath I. (1991), **Astronomy**, Gallery Books, NY.

Ridpath I. (1996), **Cambridge astronomy dictionary**, Cambridge UP, Cambridge.

Roth G. D. (1993), **Compendium of practical astronomy** , Springer-Verlag, NY.

Rowan-Robinson, M. (1990). **Our Universe, an Armchair Guide**. W.H. Freeman and Company, New-York.

Sagan C. (1992), Maran, Stephen P. ed. **The astronomy and astrophysics encyclopedia**, Van Nostrand Reinhold, NY.



Schaaf F. (1990), **Seeing the sky**, John Willey, NY.

Schaaf F. (1991), **Seeing the solar system**, John Wiley & Sons, NY.

Schatz D. (1991), **Astronomy activity book**, Simon & Schuster, NY

Silk J. (1995), **A short history of the universe**, Freeman.

Spudis P. D. (1996), **The once and future moon**, **Smithsonian Inst.** Press, Washington, D.C.

Tayler R. J. (1994) **The Stars: their structure and evolution.**, second edition, Cambridge University Press

Verschuur G. L. 1987), **The invisible universe revealed**, Springer - Verlag, NY

Wynn-Williams G. (1992), **The fullness of space**, Cambridge University Press, Cambridge.

